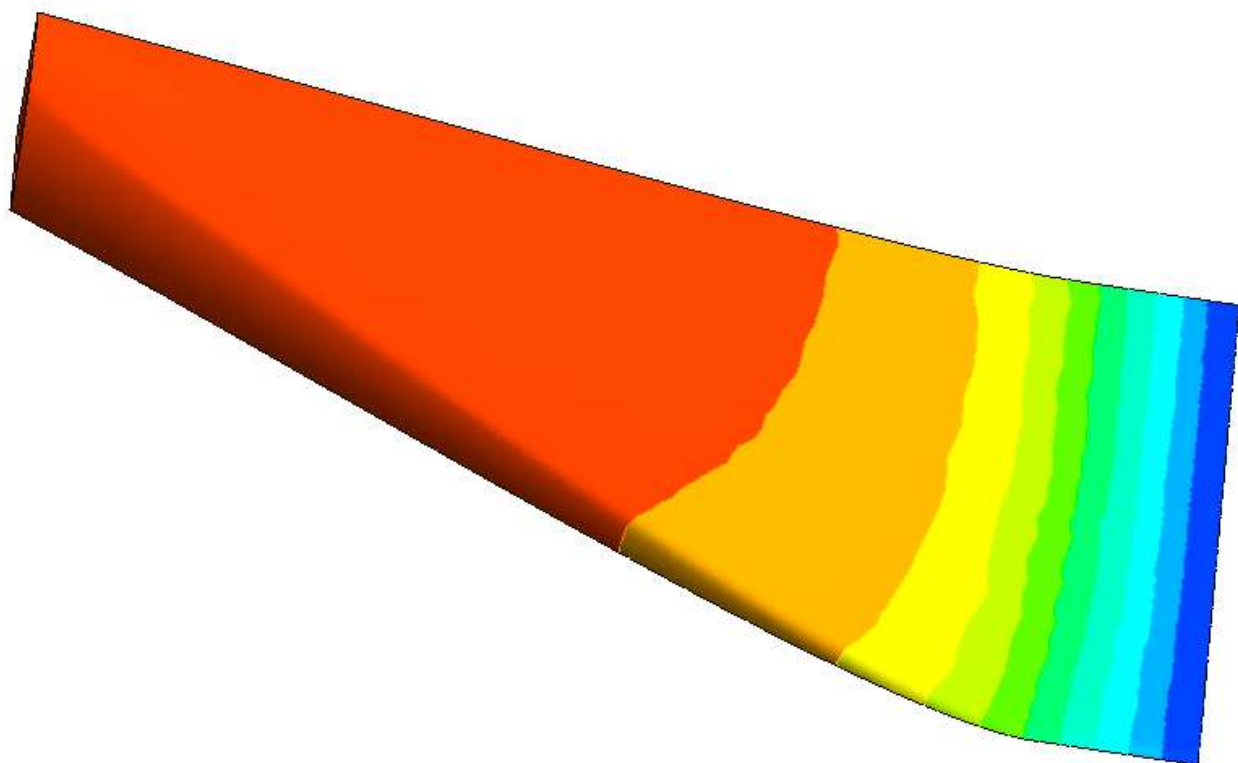


*І. І. Івіцький
О. Л. Сокольський
І. О. Мікульонок*

ПРИСТІННІ ЕФЕКТИ В ПРОЦЕСАХ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРІВ У КАНАЛАХ ПЕРЕРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ



*І. І. Івіцький
О. Л. Сокольський
І. О. Мікульонок*

ПРИСТІННІ ЕФЕКТИ В ПРОЦЕСАХ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРІВ У КАНАЛАХ ПЕРЕРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ

Монографія

Київ
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
2016

УДК 678.5.02–404+678.5.057
ББК 35.71/73
И25

*Рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ»
(Протокол № 7 від 06.06.2016 р.)*

Рецензенти: *О. М. Гавва*, д-р техн. наук, проф.,
Національний університет харчових технологій

О. С. Парфенюк, д-р техн. наук, проф.,
Донецький національний технічний університет

Івіцький І.І.

И25 Пристінні ефекти в процесах течії полімерів у каналах переробного обладнання : монографія / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок. Київ : НТУУ «КПІ», Вид-во «Політехніка», 2016. – 136 с.: іл. – Бібліогр.: с. 123–133. – 300 прим.

ISBN 978-966-622-787-7

У монографії розглянуто підходи до визначення та моделювання пристінних ефектів, що спостерігаються під час течії полімерних матеріалів у каналах переробного обладнання.

Розроблено методики визначення наявності, природи та величини пристінних ефектів у полімерних матеріалах.

Змодельовано процес течії полімерних матеріалів з урахуванням пристінних ефектів крізь канали різної конфігурації.

Для фахівців полімерного машинобудування та споріднених галузей виробництва, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

ISBN 978-966-622-787-7

УДК 678.5.02–404+678.5.057
ББК 35.71/73

© І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок, 2016
© НТУУ «КПІ», 2016

ВСТУП

Вироби з полімерних матеріалів натеper застосовуються майже у всіх сферах людського життя та галузях виробництва. З початку 1950-х років спостерігається стійка тенденція зростання світового ринку пластмас: з 1 млн т у 1950 р. до 170 млн т у 2000 р.

Натеper світове виробництво пластмас становить близько 250-260 млн т. До 75–80 % від усіх вироблених у світі полімерів належать до термопластичних матеріалів, решта – до реактопластів, еластомерів і термоеластопластів [1].

Середньосвітове споживання полімерів на одного мешканця у 2010 р. склало 37 кг і до 2020 р має збільшитися до 50 кг [1]. Відзначається, що сукупне споживання полімерних матеріалів на душу населення в процентному відношенні зростає швидше сукупного валового внутрішнього продукту. Цьому сприяють нові технології полімерних матеріалів, завдяки яким розширюються області їх застосування, причому передусім за рахунок витіснення традиційних металів, сплавів і кераміки. На початку третього тисячоліття саме така ситуація відзначається в автомобілебудуванні, аерокосмічній галузі, суднобудуванні, а також в будівництві.

В умовах ринкової економіки та високої конкуренції найбільш важливими характеристиками будь-якого виробу є собівартість та якість продукції, не винятком є і вироби з полімерних матеріалів.

Вартість виробництва залежить від багатьох чинників: складності обладнання, технології переробки, типу сировини та ін. Одним з чинників, що впливають на вартість, є час та складність кінцевої доводки параметрів переробного обладнання для отримання необхідної конфігурації виробу. Незважаючи на сучасні методи числового моделювання, переробне обладнання перед введенням у експлуатацію потребує ітераційного доведення для отримання необхідних конфігурації та характеристик виробів, це пов'язано з тим, що полімерні матеріали мають складні фізико-механічні характеристики, деякими з яких нехтують під час проектування переробного обладнання через брак відомостей щодо деяких характеристик або значне збільшення часу розрахунку при їх врахуванні [2–10].

На якість виробу впливають характеристики сировинного матеріалу, параметри переробного обладнання та технологічні режими. При створенні обладнання та технології переробки намагаються передбачити характеристики майбутнього виробу за допомогою числового моделювання. Проте, нехтування деякими характеристиками матеріалів, зокрема зазначеними вище, призводить до значної різниці в характеристиках моделі й готового виробу [11–15].

Одною з характеристик полімерних матеріалів, якою зазвичай нехтують під час числового моделювання, є наявність пристінних ефектів різної природи,

які значно впливають на точність моделювання. Найбільш істотні помилки при розрахунку каналів виникають внаслідок відсутності врахування пристінних ефектів, що мають місце під час течії деяких полімерів. Пристінні ефекти можуть значною мірою впливати на розподіл основних параметрів розплаву по всьому перерізу каналів і, як наслідок, на якісні характеристики, точність розмірів і необхідність доводки обладнання [16–21]. При переробці вторинної сировини вплив пристінних ефектів особливо виражений [22]. Крім того, виникнення нестабільностей течії пов'язують саме з пристінними ефектами [23–30].

Традиційно вважають, що відносна швидкість потоку розплаву полімерного матеріалу на стінці переробного обладнання відсутня. Хоча останнім часом деякі вчені намагаються врахувати вплив пристінних ефектів при моделюванні [31–38], але при цьому не враховується природа наявності цих ефектів у матеріалі, а створюється єдиний підхід, який не у всіх випадках демонструє прийнятну збіжність з практикою.

Врахування ж природи матеріалу, його фізико-механічних властивостей та характеристик дозволяє моделювати його течію з урахуванням пристінних ефектів максимально точно, що значно спрощує подальше налаштування обладнання та його введення в експлуатацію [39, 40].

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

B – висота каналу, мм;
 $D_{\text{вх}}$ – діаметр входу каналу, мм;
 $D_{\text{вих}}$ – діаметр виходу каналу, мм;
 H – ширина каналу, мм;
 k – коефіцієнт тертя;
 L – довжина каналу, мм;
 n – індекс течії;
 P – тиск, Па;
 Q – об’ємна витрата, м³/с;
 R – радіус каналу, мм;
 T – температура, °С;
 $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹;
 η – динамічна в’язкість, Па·с;
 μ – кінематична в’язкість, м²/с;
 v – швидкість, м/с;
 v_w – швидкість на стінці, м/с;
 ρ – густина, кг/м³;
 τ – напруження зсуву, Па.

Основні скорочення:

ПАТ – публічне акціонерне товариство (при назві установи);

НВП – науково-виробниче підприємство (при назві установи);

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»;

ПЕНТ – поліетилен низького тиску;

ПЕВТ – поліетилен високого тиску;

ПС – полістирол.

1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРУ

1.1. Огляд математичних моделей течії полімерних матеріалів з урахуванням пристінних ефектів

1.1.1. Модель тертя на основі узагальненої ньютонівської моделі в'язкої рідини

У працях [41–45] розглядається тертя між потоком і стінкою, що створює дотичний вектор напруження τ (рис. 1.1), який може бути достатнім, щоб зумовити прослизання рідини. Прослизання, у свою чергу, призводить до появи ненульової швидкості уздовж стінки. Дотичний вектор напружень залежить від градієнта швидкості рідини біля стінки таким чином, що дотична швидкість і дотичний вектор напруження спрямовані в протилежні напрямки (рис. 1.1).

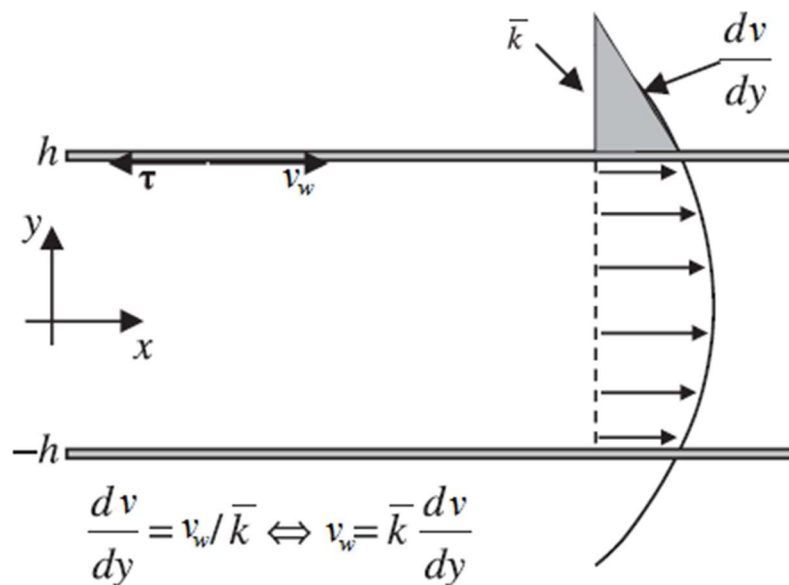


Рис. 1.1. Профіль швидкості потоку за умови ковзання на стінці: \bar{k} – коефіцієнт тертя; v – швидкість у потоці, м/с; v_w – швидкість на стінці, м/с; τ – напруження зсуву, Па; x та y – координати, спрямовані вздовж і поперек каналу

Нав'є [46] стверджує, що за наявності ковзання руху рідини має бути протиставлена сила, пропорційна відносній швидкості між рідким шаром і твердою стінкою. Рис. 1.1 ілюструє інтерпретацію ковзання, профіль швидкості по каналу і співвідношення між швидкістю та її похідною на стінці. З геометричної точки зору зазначена похідна має такий самий нахил, як і співвідношення v/\bar{k} . Таким чином, може бути отримане співвідношення, що включає в себе швидкість ковзання

$$v_w = \bar{k} \frac{dv}{dy}. \quad (1.1)$$

Враховуючи узагальнену ньютонівську модель рідини, дотичні напруження біля стінки становитимуть

$$\tau_{xy} = \eta(\dot{\gamma}) \frac{dv}{dy},$$

де η – динамічна в'язкість, Па·с; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹.

Вираз (1.28) може бути записаний з урахуванням узагальненої ньютонівської моделі

$$v_w = \text{sign}\left(\frac{dv}{dy}\right) k \tau_{xy},$$

де $k = \bar{k}/\eta(\dot{\gamma}) \geq 0$.

Цю лінійну залежність між швидкістю ковзання на стінці і напруженням зсуву на стінці називають лінійним законом ковзання Нав'є [46] або просто законом ковзання Нав'є, який широко застосовують для моделювання течії полімерних матеріалів з урахуванням пристінних ефектів [47–52]. Він широко використовується для представлення експериментальних даних, як в [53–56] для течій Куетта і Пуазейля.

З метою подолання розриву між теорією та експериментальними даними були створені різні моделі ковзання, засновані на залежності коефіцієнта тертя від швидкості або напруження зсуву на стінці та моделі, отримані з молекулярно-кінетичної теорії [57–59].

Нелінійний закон ковзання Нав'є [57] припускає, що коефіцієнт тертя залежить від напруження зсуву, який описується нелінійною степеневою функцією

$$v_w = \text{sign}\left(\frac{dv}{dy}\right) k |\tau_{xy}|^{m-1} \tau_{xy}, \quad (1.2)$$

де $m > 0$. При $m = 1$ закон перетворюється на лінійний закон ковзання Нав'є.

Ця нелінійна модель була використана для представлення експериментальних даних для течій Куетта і Пуазейля [60, 61]. Модель забезпечує прийнятне наближення до практики, але не описує швидкість ковзання в діапазонах критичного напруження зсуву, за якого починається ковзання [58]. Для усунення цієї невідповідності Хатзікіріакос (Hatzikiriakos) запропонував альтернативний закон ковзання на основі теорії в'язкої рідини Ейрінга, щоб забезпечити плавний перехід від відсутності ковзання до ковзання в потоці за умови критичних напружень зсуву [58].

Нехай τ_c – критичне напруження, за якого починається ковзання, а $k_1, k_2 \geq 0$, тоді закон ковзання Хатзікіріакоса матиме вигляд

$$v_w = \begin{cases} k_1 \sinh \left[k_2 \left(\operatorname{sign} \left(\frac{dv}{dy} \right) \tau_{xy} \right) - \tau_c \right] & , \text{ при } \tau_{xy} \geq \tau_c \\ 0 & , \text{ при } \tau_{xy} < \tau_c \end{cases} \quad (1.3)$$

Асимптотичний закон ковзання [62]

$$\tau = -\frac{1}{k_2} \left[1 - \exp \left(\frac{v}{k_1} \right) \right],$$

для одновимірного потоку вираз може бути записаний у вигляді функції швидкості ковзання

$$v_w = k_1 \ln \left[1 + k_2 \left(\operatorname{sign} \left(\frac{dv}{dy} \right) \tau_{xy} \right) \right]. \quad (1.4)$$

Для асимптотичного закону ковзання та закону Хатзікіріакоса коефіцієнти k_1 і k_2 дозволяють співставити величину ковзання і форму кривої залежності напруження зсуву від швидкості на стінці з отриманими експериментальними даними.

Для течій Пуазейля і Куетта, наведених на рис. 1.2, граничні умови ковзання можна записати в загальному вигляді як для верхньої $(+h)$, так і для нижньої $(-h)$ стінки.

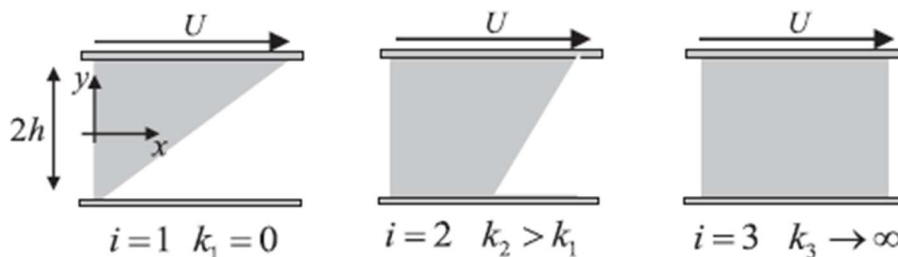


Рис. 1.2. Профілі швидкості потоку за різних коефіцієнтів тертя

Рівняння імпульсу

$$\frac{d}{dy} \left(\eta(\dot{\gamma}) \frac{dv}{dy} \right) = \frac{dp}{dx},$$

де p – імпульс, кг·м/с.

Інтегруючи рівняння імпульсу

$$\tau_{xy} = p_x y + C, \quad (1.5)$$

де C – константа інтегрування.

Об'єднавши рівняння (1.5) з рівняннями (1.2, 1.3, 1.4) для всіх досліджених законів ковзання можна одержати загальний вигляд граничних умов на верхній і нижній стінках.

Для нелінійного закону ковзання Нав'є (для лінійного закону ковзання Нав'є $m=1$)

$$v(h) = k_1 (-p_x h - C)^m,$$

$$v(-h) = k_2 (-p_x h + C)^m.$$

Для закону ковзання Хатзікіріакоса

$$v(h) = k_1 \sinh[k_2 (-p_x h - C)],$$

$$v(-h) = k_3 \sinh[k_4 (-p_x h + C)].$$

Для асимптотичного закону ковзання

$$v(h) = k_1 \ln[1 + k_2 (-p_x h - C)],$$

$$v(-h) = k_3 \ln[1 + k_4 (-p_x h + C)].$$

1.1.2. Модель тертя на основі кінетичної теорії

Автори [63] описують реологічні властивості концентрованих полімерних розчинів і розплавів за допомогою підходу, який виходить з теорії пружності каучуку. Вважається, що каучуки складаються з ниток, які постійно зшиті у точках з'єднання. Для полімерних розплавів такі нитки зшиваються тимчасово. Таким чином, у полімерних сітках вузли розриваються і з'єднуються безперервно. На рис. 1.3 наведено ідеалізовану модель, що складається з полімерних сегментів, тимчасово зшитих між собою. Вектори Q визначають розмір та орієнтацію окремих сегментів мережі.

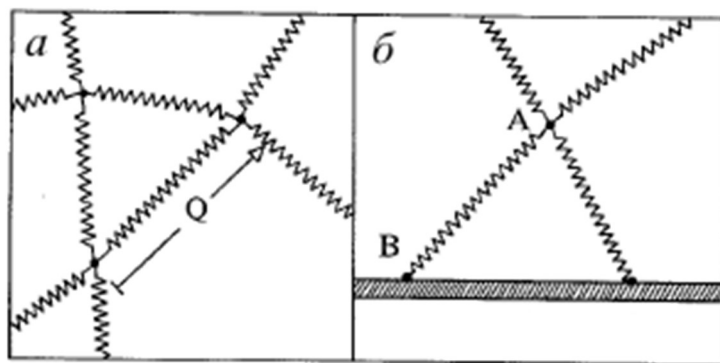


Рис. 1.3. Ідеалізована модель: а – ідеалізована полімерна сітка; б – полімерна сітка на поверхні поділу з твердою стінкою

Рівняння конвекції в кінетичній теорії для полімерних розчинів і розплавів

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{\partial}{\partial Q}(\chi Q\psi) = \hat{g} - \hat{h}, \quad (1.6)$$

де χ – градієнт тензора швидкості; ψ – функція розподілу конфігурації векторів Q , \hat{g} та \hat{h} , що представляють собою швидкості зшивання і розриву полімерних сегментів.

Швидкість розриву \hat{h} пропорційна функції розподілу конфігурації ψ , з константою пропорційності $h(Q)$, а швидкість зшивання \hat{g} пропорційна рівноважній функції розподілу ψ_0 з константою, постійною пропорційності $g(Q)$. Таким чином, можна записати

$$\hat{h}(Q, t) = h(Q)\psi(Q, t), \quad (1.7)$$

та

$$\hat{g}(Q, t) = g(Q)\psi_0(Q). \quad (1.8)$$

Враховуючи рівняння (1.7) і (1.8), можна записати (1.6) у вигляді

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial Q} \cdot (k \cdot Q\psi) = h(Q)(\psi_0 - \psi).$$

Рівноважна функція розподілу ψ_0 зводиться до розподілу Гаусса

$$\psi_0(Q) = \frac{\eta_0}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2\sigma^2}\right).$$

Значення компонентів Q дорівнюють нулю в рівновазі. У результаті відхилення σ^2 стає рівним третині середньоквадратичної рівноважної довжини сегментів.

Для кількісної оцінки швидкості розриву зв'язків був запропонований вираз

$$h(Q) = \frac{1}{\lambda_0} \left[1 + \log \left(1 + \varepsilon \frac{Q^2}{\sigma^2} \right) \right].$$

Однак, щоб підрахувати, скільки втрачених сегментів руйнуються через прилипання до стінки (що необхідно для розрахунків швидкості ковзання), запропоновано рівняння виду

$$h'(Q) = \frac{1}{\lambda_0} \left[1 + \log \left(1 + \varepsilon \frac{(|Q| - Q^*)^2}{\sigma^2} \right) \right],$$

де $|Q|$ – величина Q , а Q^* (скаляр) – критична довжина, вище якої натяг нитки здатен подолати роботу адгезії.

Для розрахунку швидкості ковзання, запропоновано вираз

$$v_w = n'_0 \sigma^2 \langle n \cdot (k \cdot Q) t_h \rangle,$$

де n – вектор паралельний напрямку потоку; t_h – час зависання кожного зруйнованого ланцюга (час, що минув між разривом і створенням нового зв'язку).

1.1.3. Анізотропна модель тертя

У праці [64] автором пропонується модель ковзання, отримана з кінетичної теорії для полімеру, та пружної моделі [65]. Конформації молекули, прикріпленої до стінки перебувають у рівновазі між дією зовнішніх сил і силою пружності

$$\zeta \left(v_w - \frac{dR}{dt} \right) - \frac{3k_B T}{a^2} R = 0, \quad (1.9)$$

де $R = (X, Y)$ – вектор орієнтації молекули; ζ – тензор тертя; k_B – стала Больцмана; T – абсолютна температура; a – характерний розмір молекули в стані рівноваги.

Ярін (Yarin) і Грехем (Graham) [65] припускають, що тензор тертя ізотропний, тобто $\zeta = \zeta_0 \delta$, де δ – одиничний тензор. Проте, якщо тензор тертя анізотропний і задається формулою Джисекуса (Gisekus) [66], $\zeta^{-1} = 1/\zeta_0 (\delta + \rho \tau)$, то рівняння (1.9) можна записати в компонентній формі

$$\left. \begin{aligned} v_w - \frac{dX}{dt} - \frac{3kT}{a^2 \zeta_0} (X + \rho \tau_{xx} X + \rho \tau_{yx} Y) &= 0 \\ \frac{dY}{dt} + \frac{3kT}{a^2 \zeta_0} (Y + \rho \tau_{yx} X + \rho \tau_{yy} Y) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

Змінна X пов'язана з напруженням зсуву за законом Гука, $\tau_{yx}/n = HX$, де $H = 3kT/a^2$ – жорсткість пружини, n – щільність молекул. Для спрощення припускається, що молекули міцно прикріплені, тому n є константою, тоді рівняння (1.10) може бути розв'язане в стійкому стані

$$v_s = \frac{1}{\zeta_0 n} \left[\frac{(1 + \rho \tau_{xx})(1 + \rho \tau_{yy}) - \rho^2 \tau_{yx}^2}{(1 + \rho \tau_{yy})} \right] \tau_{yx}.$$

При $\rho = 0$ квазістаціонарне наближення зменшує анізотропну складову моделі до закону ковзання Нав'є. Дана модель аналогічна статичній моделі ковзання Ярина-Грехема [65] за винятком того, що швидкість тут залежить від всіх компонентів напруження зсуву, а не тільки від нормальних напружень.

Розглянуті моделі дозволяють досить точно описати пристінні ефекти під час течії полімерного матеріалу по каналу, проте вони не враховують природу та характер виникнення пристінних ефектів у різних матеріалах, а застосовують загальний підхід.

1.2. Огляд методик визначення величини пристінних ефектів у полімерних матеріалах

1.2.1. Аналітичний метод розв'язання задачі течії рідини в приграничному шарі

Задача про розподіл швидкості та опір під час стабілізованої ламінарної течії середовища у прямій горизонтальній круглій трубі може бути розв'язана аналітично [16, 67].

Задача про розподіл швидкості полягає в такому.

Рух середовища по трубі радіуса R відбувається під дією перепаду тиску вздовж труби. Можна вважати, що тиск у кожному перерізі перпендикулярному осі труби, постійний й змінюється тільки в напрямку течії, причому $\frac{\partial P}{\partial x} = \text{const}$.

. Тоді швидкість середовища буде змінюватися тільки в одному напрямку – перпендикулярно течії.

Автори отримали рівняння

$$\Delta P = 8\mu l \frac{\bar{u}}{R^2}, \quad (1.11)$$

де μ – кінематична в'язкість; l – довжина каналу.

Рівняння (1.11) установлює, що перепад тиску пропорційний першій степені середньої швидкості.

У результаті приведення рівняння (1.11) до безрозмірного вигляду автори одержують

$$\zeta = \frac{64}{\text{Re}_d}. \quad (1.12)$$

Закон опору, виражений формулою (1.12), добре підтверджується

практикою.

У потоці можливі лише динамічні зміни, що виникають у результаті дії сил в'язкості, що приводять до утворення швидкісного профілю. Для цього завдання рівняння приграничного шару набувають виду

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Таким чином, вигляд функції (1.13) для ламінарної стабілізованої течії в круглій трубі може бути визначений аналітично.

1.2.2. Метод визначення в'язкосних властивостей розплаву і впливу стінки на ці властивості

Під час течії поліетилену й деяких інших полімерів у циліндричних каналах можуть мати місце пристінні ефекти, які зазвичай проявляються в неінваріантності кривих течії відносно діаметра каналу. Пристінні ефекти під час течії поліетилену експериментально виявляються за радіуса каналу, більшого деякої граничної величини. Вони можуть бути пояснені виникненням аномального шару в стінці каналу з в'язкістю, що відрізняється від в'язкості матеріалу поза цим шаром.

Наявність аномального шару можна пояснити впливом стінки на процеси структурування в потоці розплаву полімеру, що, крім напруження зсуву, є додатковим чинником, що впливає на в'язкість розплаву. Найбільшу кількість досліджень пристінного шару здійснювали для поліетиленів [68–72].

Для опису аномальної поведінки поліетилену може бути запропоновано декілька реологічних моделей. Спочатку розглянемо найбільш просту з них – модель двошарової рідини [73, 74].

Для круглого циліндричного каналу швидкість потоку двошарової рідини, одна з яких тече в пристінному шарі завтовшки b , а інша займає центр потоку, може бути виражена рівнянням

$$U(r) = \int_{a-y}^a g(\tau) dr - \int_r^{a-b} f(\tau) dr,$$

де $U(r)$ – швидкість у точці каналу з радіальною координатою r , м/с; r – радіальна координата, м; a – радіус каналу, м; τ – напруження зсуву в точці каналу з координатою r , Па; b – товщина шару рідини, що тече біля стінки каналу, м; y – відстань від стінки, м.

Витрати визначаються залежністю

$$U(r) = \int_{a-y}^a g(\tau) dr - \int_r^{a-b} f(\tau) dr$$

або

$$Q = 2\pi \int_0^a \left[\int_{a-y}^a g(\tau) dr + \int_r^{a-b} f(\tau) dr \right] dr. \quad (1.14)$$

Після інтегрування по частинам, при $b = a$, $Q = 0$ автори отримують рівняння

$$\frac{Q}{\pi a^3} \tau_a^3 = \frac{Q_2}{\pi a^3} \tau_a^3 = \int_0^{\tau_a} g(\tau) d\tau.$$

При цьому криві течії стають інваріантними. Збільшення радіуса каналу супроводжується відносним зменшенням витрати рідини, що тече біля його стінок.

Опис аномальних властивостей потоку поліетилену, виконаний авторами [73], виходячи із припущення про те, що на певній відстані від стінки градієнт швидкості зсуву визначається не тільки прикладеною величиною напруження зсуву, але й деяким чинником, що залежить від впливу стінки на процеси структурування в потоці й повністю загасає на деякій відстані від стінки. Для цього випадку градієнт швидкості зсуву може бути визначений рівнянням

$$\frac{dU}{dy} = -f(\tau) - \psi(\tau, y), \quad (1.15)$$

де y – відстань від стінки каналу.

Якщо $y \geq b$, то $\psi(\tau, y) \equiv 0$.

Умова (1.15) дозволяє визначити профіль швидкостей у круглому каналі у вигляді співвідношення

$$U(r) = - \int_r^a f(\tau) dr - \int_r^a \psi(\tau, y) dr. \quad (1.16)$$

Для круглого каналу $y = a - r$.

Якщо $a - r \geq b$, то $\int_r^a \psi(\tau, y) dr \equiv 0$.

Припускаючи, що функція

$$\psi(\tau, y) = \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right), \quad (1.17)$$

та підставляючи вираз (1.17) у рівняння (1.16) і інтегруючи по частинам з наступною заміною змінних матимемо

$$Q = \frac{\pi a^3}{\tau_a^3} \int_0^{\tau_a} \tau^2 f(\tau) d\tau + (a-b)^2 \frac{a}{\tau_a \left(\frac{a-b}{a}\right)^{\tau_a}} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)^{\tau_a}}^{\tau_a} \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau + \frac{\pi a^3}{\tau_a^3} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)^{\tau_a}}^{\tau_a} \tau^2 \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau. \quad (1.18)$$

Розглянуто два окремі випадки рівняння (1.18).

При $b = 0$:

$$Q = \frac{\pi a^3}{\tau_a^3} \int_0^{\tau_a} \tau^2 f(\tau) d\tau. \quad (1.19)$$

При цьому криві течії будуть інваріантні й рідина матиме нееньютоновські властивості. Рівняння (1.19) приблизно виконується й для $a \square b$.

Якщо $b = a$:

$$Q = \frac{\pi a^3}{\tau_a^3} \left[\int_0^{\tau_a} \tau^2 f(\tau) d\tau + (a-b)^2 \frac{a}{\tau_a} \int_0^{\tau_a} \tau^2 \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau \right].$$

З огляду на рівняння (1.18), можна записати

$$s\left(\frac{y}{b}\right) = s\left(\frac{a - \frac{a}{\tau_a} \tau}{a}\right) = s\left(1 - \frac{\tau}{\tau_a}\right) = s(\tau).$$

Звідси треба, щоб при $b = a$ криві течії визначалися тільки прикладеними напруженнями зсуву й не залежали від діаметра каналу.

Функція $s\left(\frac{y}{b}\right)$ має задовольняти наступні умови:

$$s\left(\frac{y}{b}\right) = 1 \quad \text{— при } y = 0, \quad s\left(\frac{y}{b}\right) \equiv 0 \quad \text{— при } y \square b.$$

Найбільш проста залежність, що задовольняє цим умовам має вигляд

$$s\left(\frac{y}{b}\right) = \frac{b-y}{b},$$

що еквівалентно співвідношенню

$$s\left(\frac{y}{b}\right) = \frac{b-y}{b} = \frac{c\left(b-a+\frac{a_\tau}{\tau_a}\right)}{a}. \quad (1.20)$$

Вираз (1.18) після перетворення матиме вигляд

$$\frac{Q}{\pi a^3} \tau_a^3 = \int_0^{\tau_a} \tau^2 f(\tau) d\tau + \frac{\tau_a^2}{a^2} (a-b)^2 \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau + \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \tau^2 \varphi(\tau) s\left(\frac{y}{b}\right) d\tau.$$

Підставляючи умову (1.20) у рівняння (1.18) і диференціюючи по τ_a

$$\begin{aligned} \frac{1}{\pi a^3} \left[\tau_a \frac{dQ}{d\tau_a} + 3Q \right] &= f(\tau_a) + c\varphi(\tau_a) \left[1 - \left(\frac{a-b}{a} \right) + \left(\frac{a-b}{a} \right)^2 - \left(\frac{a-b}{a} \right)^3 \right] - \\ &- \frac{2c(a-b)^3}{a^3 \tau_a} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \varphi(\tau) d\tau + \frac{c(a-b)^2}{a^2 \tau_a^2} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \tau \varphi(\tau) d\tau - \frac{c}{\tau_a^4} \int_{\left(\frac{a-b}{a}\right)\tau_a}^{\tau_a} \tau^3 g(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Аналіз рівняння (1.21) показує, що величина градієнта швидкості зсуву на стінці каналу обумовлена тільки напруженнями зсуву і може бути приблизно визначена шляхом експериментів, проведених на каналах більших діаметрів. Для більших діаметрів рівняння (1.21) перетвориться на залежність

$$\frac{1}{\pi a^3} \left[\tau_a \frac{dQ}{d\tau_a} + 3Q \right] = f(\tau_a),$$

а нахил кривих течії може бути визначений за формулою

$$\frac{4Q}{\pi a^3} \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right) = f(\tau_a),$$

де

$$\frac{1}{n'} = \frac{d \ln \left(\frac{4Q}{\pi a^3} \right)}{d \ln \tau_a}.$$

Таким чином, на більших діаметрах неінваріантність кривих течії експериментально визначити неможливо, оскільки вони несуттєво

відрізнятимуться одна від одної, прагнучи до загальної кривої.

Зі зменшенням діаметра каналу настає момент, коли починає виконуватися умова $b = a$. При цьому рівняння (1.21) перетвориться в такий спосіб

$$\frac{1}{\pi a^3} \left[\tau_a \frac{dQ}{d\tau_a} + 3Q \right] = f(\tau_a) + \varphi(\tau_a) - \frac{c}{\tau_a^4} \int_0^{\tau_a} \tau^3 \varphi(\tau) d\tau.$$

Ввівши змінну

$$T = \frac{4Q}{\pi a^3},$$

з урахуванням якої

$$\left(\frac{3}{4}T + \frac{\tau_a}{4} \frac{dT}{d\tau_a} \right) = f(\tau_a) + \varphi(\tau_a) - \frac{1}{\tau_a^4} \int_0^{\tau_a} \tau^3 \varphi(\tau) d\tau. \quad (1.22)$$

З рівняння (1.22) видно, що крива течії визначається тільки напруженнями зсуву незалежно від діаметра каналу, тобто є інваріантною. Нахил кривої течії може бути визначений за формулою

$$\frac{4Q}{\pi a^3} \left(\frac{3k' + 1}{4k'} \right) = f(\tau_a) + \varphi(\tau_a) - \frac{1}{\tau_a^4} \int_0^{\tau_a} \tau^3 \varphi(\tau) d\tau. \quad (1.23)$$

У рівнянні (1.23) k' – величина, аналогічна за формою запису величині n' , але визначена на малих діаметрах.

Запропонована модель рідини, для якої на деякій відстані від стінки в'язкісні властивості не визначаються тільки одним напруженням зсуву при величині цієї відстані в межах від нуля до радіуса каналу, дозволяє описати аномальні властивості розплаву поліетилену більш точно, ніж модель двошарової рідини.

Проте, зазначені методи не дозволяють визначити природу пристінних ефектів та дають змогу визначити величину ефекту не в усьому діапазоні перерізів каналів.

1.2.3. Дослідження профілю швидкостей під час течії розплаву в циліндричних каналах

При експериментальному дослідженні потоку розплаву полімеру часто застосовують метод спостереження за переміщенням міток. Кількісне визначення швидкостей звичайно пов'язане з використанням прозорих корпусів каналів, що обмежує діапазон досліджуваних температур і тисків. Для

дослідження профілю швидкостей розплаву поліетилену було застосоване створення міток імпульсним введенням підфарбованого матеріалу.

Дослідження [75] проводилися на установці, призначеній для вивчення опору каналів під час течії розплавів полімерів. Установка (рис. 1.4) обладнана пристроєм для упорскування пофарбованого матеріалу, яке здійснювали за допомогою штока 17, що приводиться в рух гідросистемою 19, аналогічній гідросистемі 3, використаної для привода основного плунжера.

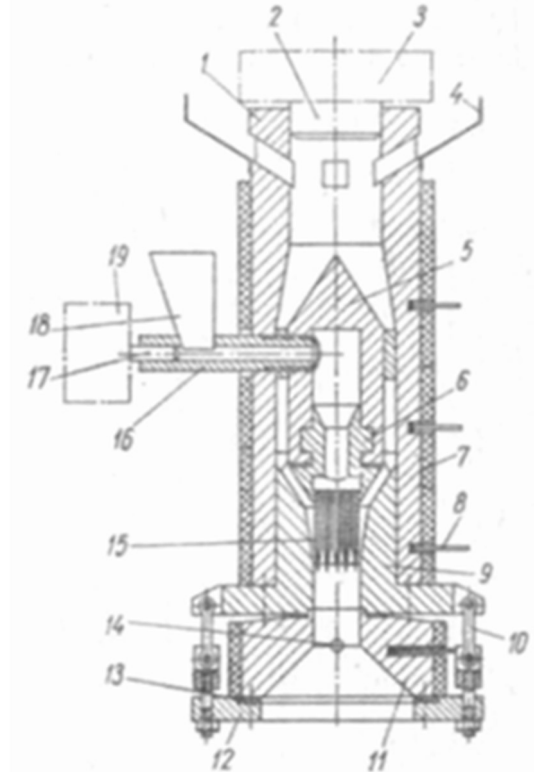


Рис. 1.4. Схематичний розріз установки для дослідження профілю швидкостей (поясненні в тесті)

Підфарбований матеріал захоплювався штоком з бункера 18 і крізь циліндр 16, порожнисту торпеду 5, насадку 6 і сопла 15 з отворами діаметром 0,5 мм впорскувався в основний потік на різних відстанях від стінки каналу на ділянці з розвиненим профілем швидкостей. Інтервали між упорскуваннями змінювалися від 3 до 25 с за допомогою реле обліку імпульсів, що управляє через виконавче реле електромагнітом золотникового гідророзподільника. Дросельний пристрій забезпечував необхідну швидкість упорскування. За інтервалів часу між упорскуваннями понад 25 с керування упорскуванням здійснювали вручну.

У момент упорскування із сопла видавлювалися частинки підфарбованого матеріалу, які захоплювалися основним потоком. Частота упорскування вибиралася так, щоб на одній траєкторії виявлялося не менш трьох підфарбованих частинок-міток. Наприкінці ходу основного плунжера 2

канал перекривався засувкою.

Замір відстаней між мітками виконували безпосередньо після розбирання корпусу каналу до охолодження розплаву. Швидкість руху визначали як частку від розподілу відстані між двома сусідніми мітками, розташованими в потоці, віднесеної до часу між їх утворенням.

Опір каналу визначали за величиною зусилля, переданого через плиту 12, на якій був установлений корпус каналу 11, і тяги на пластинки тензодатчиків 10. Одночасно плунжерні датчики тиску вимірювали перепад тиску в трьох точках по довжині каналу.

Проведені експерименти з ПЕНТ показали, що у процесі течії проявляються аномальні пристінні ефекти. Ці ефекти пояснюють як наявністю постійного або періодичного проковзування матеріалу по стінці каналу або по шару матеріалу, нерухомого відносно стінки, так і існуванням пристінного шару зі зниженою в'язкістю, обумовленою додатковою орієнтацією макромолекул, надаваною стінкою, або молекулярним фракціонуванням під час течії.

Зниження в'язкості в пристінному шарі можна пояснити переважним руйнуванням структур на границі зі стінкою. Оскільки ці ефекти проявляються в безпосередній близькості від стінки, то за досить малої величини відносно товщини шару, у якому помітно проявляється їхня дія, до радіуса каналу можна вважати, що вони діють безпосередньо на стінці, і виражати їх через ефективну швидкість ковзання, що за наявності дійсного ковзання дорівнюватиме швидкості ковзання.

Проведені експерименти підтвердили наявність пристінних ефектів, що мають значний вплив на процес течії й характер потоку розплаву полімеру. Їх врахування дозволить усунути похибки при побудові й використанні кривих течії. Проте розглянуті методи не дозволяють використати отримані дані для числового розрахунку з використанням систем автоматизованого проектування.

1.2.4. Метод врахування пристінних ефектів під час ковзання розплаву по стінці каналу

У практиці розрахунку каналів головок черв'ячних машин важливе місце займає розрахунок круглих і плоскощільних каналів [32, 76–80]. Круглі циліндричні канали зручні для проведення реологічних досліджень, а до плоскощільних каналів при розрахунку умовно приводять канали більш складних форм, наприклад, щілини змінної висоти, кільцеві циліндричні й кільцеві конічні канали.

До пристінних ефектів, передусім, варто віднести ковзання матеріалу по границі розподілення зі стінкою каналу [49, 81–84].

Пристінні ефекти можуть проявлятися також в утворенні в безпосередній близькості від стінки каналу шару з аномально зниженою в'язкістю або в

ковзанні матеріалу по тонкому шару змащувальної речовини [85, 86]. В останніх двох випадках зазвичай можна вважати, що на стінці каналу є ефективна швидкість ковзання, що залежить від напруження зсуву на стінці й фактично дорівнює збільшенню швидкості потоку в пристінному аномальному шарі або в шарі змащення [87–89]. Це спрощення багато в чому збігається з відомим підходом до опису течії дисперсних систем. У випадку, коли товщина аномального пристінного шару дорівнює нулю, ефективна швидкість ковзання збігається зі швидкістю ковзання по границі контакту зі стінкою каналу [90].

Розглядаючи течію матеріалу в круглому циліндричному каналі за наявності ковзання на стінці каналу. Швидкість потоку v_r , у точці круглого циліндричного каналу з радіальною координатою r може бути виражена рівнянням

$$v_r = - \int_r^R f(\tau) dr - S(\tau_r), \quad (1.24)$$

де $f(\tau)$ – функція, що залежить від напруження зсуву; τ_r – напруження зсуву на стінці каналу; $S(\tau_r)$ – швидкість ковзання на стінці каналу.

Величина витрати для циліндричного каналу

$$Q = 2\pi \int_0^R r v_r dr. \quad (1.25)$$

Підставивши рівняння (1.24) у формулу (1.25) та виконавши інтегрування вроздріб і зробивши заміну змінних з використанням співвідношення, справедливого для круглого каналу, матимемо

$$\tau = \frac{r}{R} \tau_r,$$

після перетворення

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{S(\tau_r)}{R} + \frac{1}{\tau_r^3} \int_0^{\tau_r} \tau^2 f(\tau) d\tau. \quad (1.26)$$

Продиференціювавши рівняння (1.26) по напруженню зсуву на стінці каналу, отримаємо

$$f(\tau_r) = \frac{1}{\pi R^3} \left[\tau_r \frac{dQ}{d\tau_r} + 3Q \right] - \frac{1}{R} \left\{ \tau_r \frac{d[S(\tau_r)]}{d\tau_r} + 3S(\tau_r) \right\}.$$

Використовуючи поняття логарифмічної похідної та вводячи позначення

$$\Gamma = \frac{4Q}{\pi R^3},$$

$$\frac{d \ln \Gamma}{d \ln \tau_R} = \frac{1}{n'},$$

та

$$\frac{d \ln [S(\tau_R)]}{d \ln \tau_R} = \frac{1}{k'},$$

отримаємо

$$f(\tau_R) = \Gamma \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right) - \frac{S(\tau_R)}{R} \left(\frac{3k' + 1}{k'} \right). \quad (1.27)$$

Величина $f(\tau_R)$ є градієнтом швидкості зсуву на стінці каналу, а n' і k' – тангенс кутів нахилу логарифмічних кривих залежності напруження зсуву на стінці каналу відповідно до ефективного градієнта швидкості зсуву й від швидкості ковзання на стінці каналу.

Особливий інтерес представляє питання про визначення опору каналів за наявності пристінних ефектів за відомими реологічними характеристиками полімерних матеріалів [91–95]. Для розрахунків опору каналів головок черв'ячних машин найбільш зручно використовувати реологічні характеристики, отримані методом капілярної віскозиметрії, тобто на круглих каналах. Тому врахування пристінних ефектів при розрахунку опору круглих каналів найбільше просто може бути зроблено використанням кривої течії, отриманої на каналі, діаметр якого дорівнює діаметра каналу, що розраховується. Цей метод припускає попереднє визначення реологічних характеристик полімерів на каналах різних діаметрів і використання інтерполяції, проте за такого підходу втрачається універсальний характер врахування властивостей.

1.2.5. Метод Муні

Для дослідження тертя рідини по твердій стінці в розплаві також застосовують метод Муні [31, 96]. В основу цього методу покладено припущення, що коли рідина не прилипає до стінок, швидкість рідини на стінці створює більш високу об'ємну витрату Q порівняно з повним прилипанням до стінок. Середня швидкість потоку, що безпосередньо може бути виміряна

$$v_{\text{сеп}} = \frac{Q}{\pi R^2}. \quad (1.28)$$

Середня швидкість потоку $v_{\text{сер}}$ пов'язана з істинною середньою швидкістю $v_{\text{іст}}$ через швидкість ковзання $v_{\text{ковз}}$

$$v_{\text{іст}} = v_{\text{сер}} - v_{\text{ковз}}.$$

Помноживши на $4/R$, знаходиться зв'язок між істинною швидкістю зсуву і середньою швидкістю зсуву

$$\begin{aligned}\dot{\gamma}_{\text{сер}} &= \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4v_{\text{сер}}}{R}, \\ \dot{\gamma}_{\text{іст}} &= \dot{\gamma}_{\text{сер}} - \dot{\gamma}_{\text{ковз}}, \\ \frac{4v_{\text{іст}}}{R} &= \frac{4v_{\text{сер}}}{R} - \frac{4v_{\text{ковз}}}{R}.\end{aligned}\quad (1.29)$$

Підставивши (1.28) у (1.29)

$$\frac{4Q}{\pi R^3} = 4v_{\text{ковз}} \frac{1}{R} + \frac{4v_{\text{іст}}}{R}.$$

При побудові графіка $\frac{4Q}{\pi R^3}$ від $1/R$ отримують лінію з тангенсом куту нахилу, рівним чотирьом швидкостям ковзання.

Недоліком методу Муні є відсутність врахування неньютонівського характеру течії розплаву полімеру під час розрахунку.

1.2.6. Поправка Рабіновича

Для врахування ньютонівського характеру течії розплаву полімеру використовують поправку Рабіновича [97].

На площі поперечного перетину циліндричного каналу виділяється елементарне кільце з поточним радіусом r завтовшки dr . Елементарна площа такого кільця дорівнює

$$dS(r) = 2\pi r dr. \quad (1.30)$$

Введемо термін "безрозмірний радіус"

$$\beta = \frac{r}{r_w}, \quad (1.31)$$

де r – поточний радіус, r_w – радіус стінки каналу.

Перетворюючи (1.31)

$$r = r_w \beta; \quad dr = r_w d\beta. \quad (1.32)$$

Підставляючи (1.32) у (1.30)

$$dS(\beta) = 2\pi r_w^2 \beta d\beta. \quad (1.33)$$

Елементарна об'ємна витрата рідини крізь кільце дорівнює:

$$dq(\beta) = dS(\beta) \cdot V(\beta). \quad (1.34)$$

Враховуючи, що під час течії степеневі рідини в циліндричному каналі швидкість течії на безрозмірному радіусі

$$V(\beta) = V_{\max} \left(1 - \beta^{\frac{n+1}{n}} \right). \quad (1.35)$$

Підставляючи (1.33) та (1.35) в (1.34)

$$dq(\beta) = 2\pi r_w^2 \beta d\beta \cdot V_{\max} \left(1 - \beta^{\frac{n+1}{n}} \right). \quad (1.36)$$

Враховуючи, що під час течії степеневі рідини в циліндричному каналі, максимальна швидкість течії по центру каналу

$$V_{\max} = \frac{n}{n+1} r_w \dot{\gamma}_w. \quad (1.37)$$

Підставляючи (1.37) в (1.36)

$$dq(\beta) = 2\pi r_w^2 \beta d\beta \cdot \frac{n}{n+1} r_w \dot{\gamma}_w \left(1 - \beta^{\frac{n+1}{n}} \right).$$

Перетворюючи це рівняння

$$dq(\beta) = 2\pi \frac{n}{n+1} r_w^3 \dot{\gamma}_w \left(\beta d\beta - \beta^{\frac{n+1}{n}} d\beta \right).$$

Інтегруючи попередню залежність межах від 0 до 1

$$q = 2\pi \frac{n}{n+1} r_w^3 \dot{\gamma}_w \left(\int_0^1 \beta d\beta - \int_0^1 \beta^{\frac{2n+1}{n}} d\beta \right)$$

отримаємо

$$q = 2\pi \frac{n}{n+1} r_w^3 \dot{\gamma}_w \frac{n+1}{2(3n+1)} = \pi \frac{n}{3n+1} r_w^3 \dot{\gamma}_w.$$

Перетворивши відносно швидкості зсуву

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3n+1}{4n} \frac{4q}{\pi r_w^3}. \quad (1.38)$$

Комплекс

$$R = \frac{3n + 1}{4n}.$$

називається поправкою Рабіновича.

При $n=1$ для ньютонівської рідини $R=1$ і вираз (1.38) перетворюється на формулу для розрахунку швидкості зсуву на стінці каналу

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4q}{\pi r_w^3}.$$

Поправка Рабіновича враховує збільшення швидкості зсуву на стінці каналу в результаті "притуплення" профіля швидкостей для степеневих рідин.

1.3. Висновки і завдання досліджень

Проведений огляд показав, що раніше розглядалися окремі питання пристінних ефектів під час течії розплаву полімеру, проте вони мають низку недоліків:

- розглянуті моделі дозволяють досить точно описати пристінні ефекти під час течії полімерного матеріалу по каналу, проте вони не враховують природу та характер виникнення пристінних ефектів у різних матеріалах, а застосовують загальний підхід;
- розглянуті методи не дозволяють визначити природу пристінних ефектів та дають змогу визначити величину ефекту не в усьому діапазоні перерізів каналів;
- розглянуті методи не дозволяють використати отримані дані для числового розрахунку з використанням систем автоматизованого проектування;
- у разі підходу до розрахунку з використанням розглянутих методів втрачається універсальний характер врахування властивостей пристінних шарів;
- недоліком методу Муні є відсутність врахування неньютонівського характеру течії розплаву полімеру для розрахунку швидкості на стінці.

Таким чином, відсутній комплексний універсальний підхід до визначення характеру та величини пристінних ефектів і можливості використання цих даних для подальшого числового моделювання процесів течії [98, 99].

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Дослідно-експериментальна установка

Для проведення досліду була застосована експериментальна установка на базі капілярного віскозиметра типу ПРТ-3 (рис. 2.1), який складається із опорної плити 1, стійки 2, кронштейна 3, штурвала 4, гвинта 5, вантажу 6, поршня з тримачем 7, нагрівної ємності 8 та дзеркала 9.

Установка призначена для нагрівання і видавлювання матеріалу та для проведення замірів продуктивності. На опорній плиті 1 кріпиться стійка 2, у верхній частині якої закріплено кронштейн 3, а в нижній – нагрівна ємність 8. На вільному кінці кронштейна 3 змонтовано видавлювальний пристрій, який складається з гвинта 5 і штурвала 4. При обертанні штурвала гвинт рухається поступально.

Видавлювання матеріалу забезпечується поршнем з тримачем вантажів 7, на якому розташовують вантажі 6 необхідної маси.

У вимірювальний комплект також входять мідні поршні для трамбування матеріалу та очищення каналу, рівень для установки приладу у вертикальне положення.

У свою чергу, нагрівна ємність, наведена на рис. 2.2, складається із накладок 1, 6, 15, кришки 2, склотканини 3, циліндра 4, прокладки 5, нагрівника 7, термометра опору 8, шайб 9, 19, ексцентрика 10, каліброваного сопла 11, корпусу вимірювального каналу 12, затвору 13, пластин 14, 20, захисного екрану 16, скловати 17, гвинтової стяжки 18 та корпусу головки 21.

Циліндр 4 з випробувальним каналом розташований у мідному корпусі 12 і утримується в ньому за рахунок конусності. У нижній частині каналу розташоване змінне вимірювальне каліброване сопло (капіляр) 11, яке утримується затвором 13. За допомогою ексцентрика 10 затвор 13 переміщують, звільняючи сопло. Прогрів каналу до необхідної температури забезпечується електронагрівником 7, а контроль температури – термопарою 8. Захисний екран 16, шайби 9 і 19 служать для зменшення втрат теплоти. Корпус з нагрівником і захисним екраном закріплений між пластинами 14 і 20 гвинтовими стяжками. Теплова ізоляція забезпечується накладками 1, 6, 15 і скловатою 17, розташованою в корпусі головки 21.

Температура в каналі регулюється автоматичним регулятором температури, змонтованим в окремому корпусі.

Реологічні властивості розплавів полімерів досліджуються на капілярному віскозиметрі типу ПРТ-3 у діапазоні швидкостей зсуву $\dot{\gamma}=10\ldots1000\text{ с}^{-1}$.

Технічна характеристика приладу ПРТ-3:

1. Розміри робочого комплексу деталей, мм:

– діаметр каналу $9,54\pm0,016\text{ мм}$;

- діаметр поршня $9,48 \pm 0,010$ мм;
- сопло 1 – внутрішній діаметр $d_1 = 1 \pm 0,005$ мм; довжина $L_1 = 8 \pm 0,025$ мм;
- сопло 2 – внутрішній діаметр $d_2 = 1,18 \pm 0,005$ мм; довжина $L_2 = 8 \pm 0,025$ мм;
- сопло 3 – внутрішній діаметр $d_3 = 1,5 \pm 0,005$ мм; довжина $L_3 = 12 \pm 0,025$ мм;
- сопло 4 – внутрішній діаметр $d_4 = 2 \pm 0,005$ мм; довжина $L_4 = 16 \pm 0,025$ мм;
- сопло 5 – внутрішній діаметр $d_5 = 2,095 \pm 0,005$ мм; довжина $L_5 = 8 \pm 0,025$ мм;
- сопло 6 – внутрішній діаметр $d_6 = 2,095 \pm 0,005$ мм; довжина $L_6 = 16 \pm 0,025$ мм;
- сопло 7 – внутрішній діаметр $d_7 = 2,5 \pm 0,005$ мм; довжина $L_7 = 20 \pm 0,025$ мм;
- сопло 8 – внутрішній діаметр $d_8 = 3 \pm 0,005$ мм; довжина $L_8 = 24 \pm 0,025$ мм.

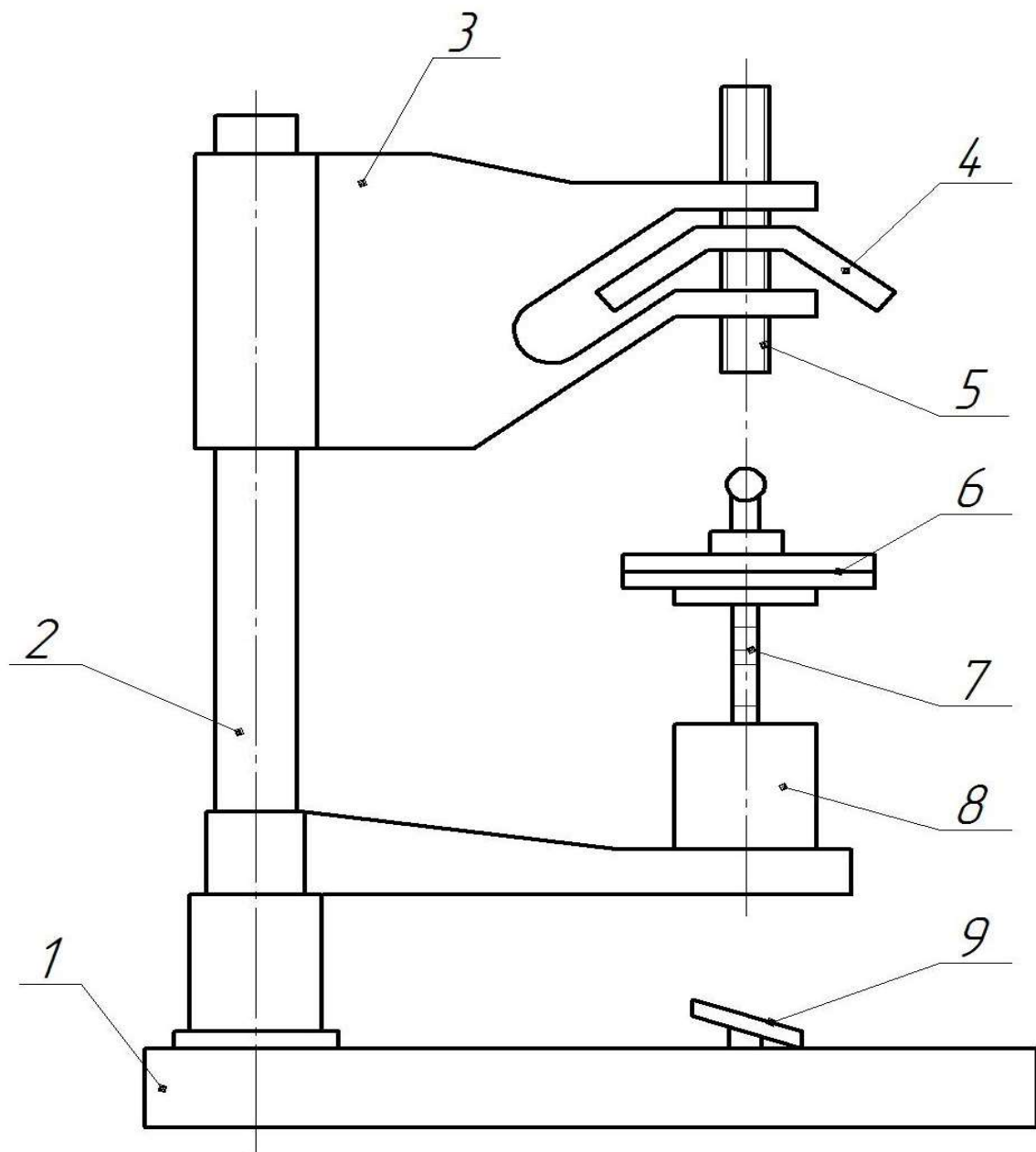


Рис. 2.1. Експериментальна установка (пояснення в тексті)

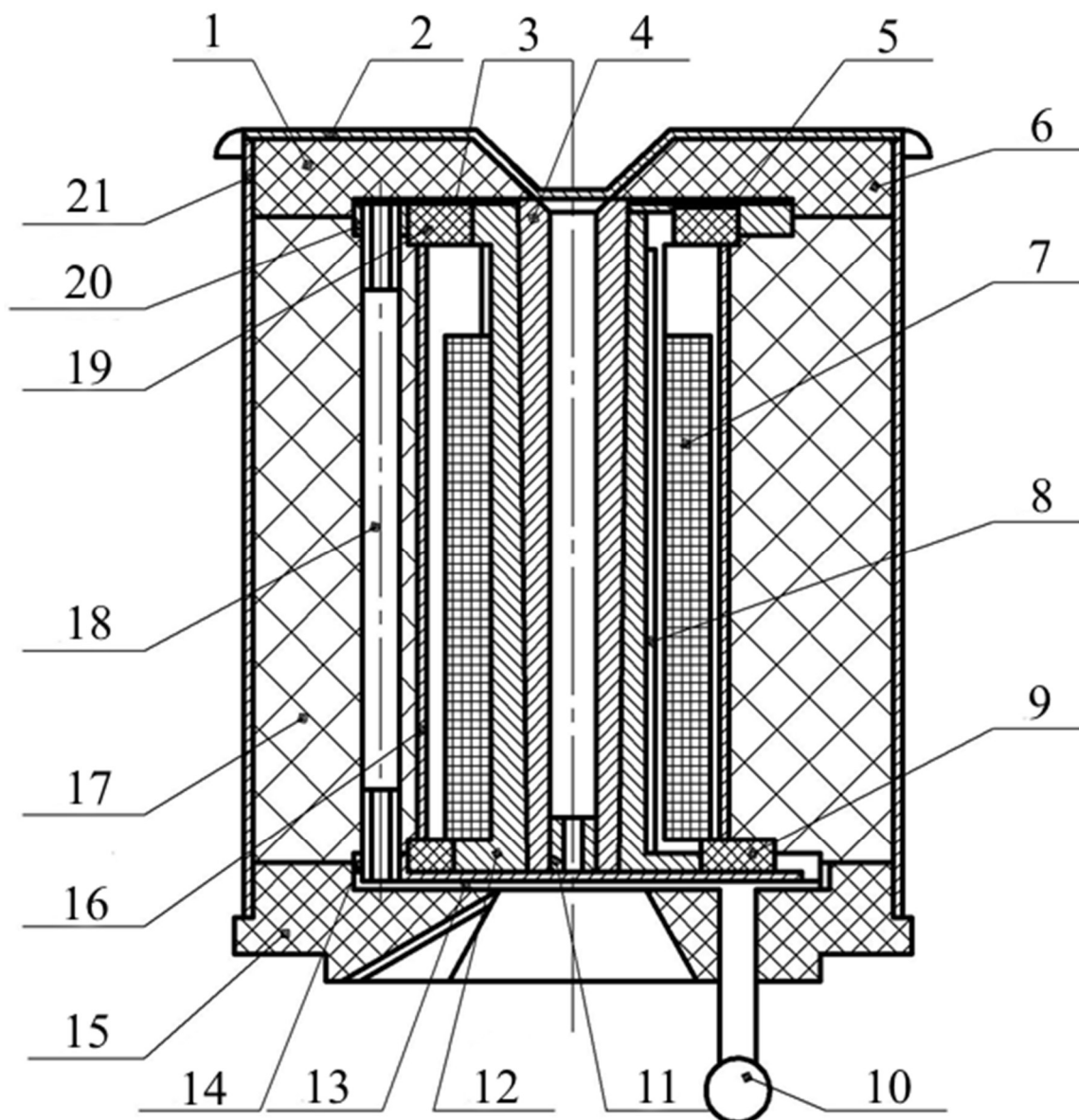


Рис. 2.2. Вимірювальна головка в розрізі (пояснення в тексті)

2. Набір вантажів: 0,45; 0,96; 1,2; 1,64; 4,095; 4,995 і 4,995 кг, а також поршень з тримачем масою 1,2 кг.

Принцип дії приладу базується на вимірюванні об'ємної продуктивності течії розплаву крізь каліброване сопло за різних фіксованих значень тиску та температури. Прилад складається з двох блоків: вимірювального пристрою та автоматичного регулятора температури.

Температура підтримувалася за допомогою одноканального ПД-регулятора температури МікРа 600 (рис. 2.3). Технічні характеристики приладу наведені в табл.таблиця 2.1. Для зворотного зв'язку була використана хромель-алюмелева термопара. Діапазон регульованих температур залежно від типу термопари наведений у табл. 2.2.



Рис. 2.3. Одноканальний ПІД-регулятор температури МікРа 600

Таблиця 2.1. Технічні характеристики регулятора

Дискретність завдання температури, °С	1,0
Закон регулювання каналу нагріву	ПІД
Вихідний сигнал керування	ШІМ
Точність підтримання температури у встановленому режимі	±0,5
Напруга живлення	110–250 В, 50–60 Гц
Розміри, мм	48 × 48 × 120
Маса, грам	170

Таблиця 2.2. Діапазон регулювання Мікра-600

Тип ТП	ТХК (L)	ТХА (K)	ТЖК (J)	ТПП (S)	ТПП (R)	ТПР (B)	ТВР (A-2)	ТСМ - 50	ТСП - 50	ТСМ-100	ТСП-100
Температура, °С	від –50 до 550	від –50 до 1300	від –50 до 800	від 0 до 1700	від 0 до 1700	від 600 до 1700	від 0 до 1700	від –50 до 200	від –50 до 800	від –50 до 200	від –50 до 250

Час, за який матеріал видавлювався крізь сопло, вимірювся за допомогою секундоміра «Інтеграл С-01» (рис. 2.4). Характеристики приладу наведені в табл. 2.3.



Рис. 2.4. Секундомір електронний "Інтеграл С-01"

Таблиця 2.3. Технічні характеристики секундоміра "Інтеграл С-01"

Параметр	Значення
Дискретність відліку часу, с	0,01
Максимальний обсяг рахунку	9 год 59 хв 59,99 с
Запам'ятовується проміжних результатів	10
Габаритні розміри, мм	77 x 58 x 18

Межа допустимої додаткової абсолютної похибки секундоміра, викликаної відхиленням температури навколишнього середовища від нормальних умов в інтервалі робочих температур від мінус 10 °С до +50 °С на 1 °С відхилення температури не повинен перевищувати величини $\Delta 1 = (9,6 \times 10^{-6} \times T_x + 0,01)$, $\Delta 2 = 2,2 \times 10^{-6} \times T_x$.

Зразки полімеру зважували на електронних лабораторних вагах марки ТВЕ-0,3-0,005 (Техноваги) (рис. 2.5). Характеристики приладу наведені в табл. 2.4.



Рис. 2.5. Ваги електронні лабораторні ТВЕ-0,3-0,005 (Техноваги)

Таблиця 2.4. Технічні характеристики ТВЕ-0,3-0,005 (Техноваги)

Параметр	Значення
Дискретність, г	0,005
Найменша границя зважування, г	0,1
Найбільша границя зважування, г	300
Діаметр платформи, мм	120
Клас точності згідно з ГОСТ 53228-2008	II (високий)

2.2. Методика дослідження

Заміри швидкості зсуву робили відповідно до ГОСТ 11645-73 «Метод визначення показника текучості розплаву термопластів» [100].

1. Підготувати прилад для дослідів. Перевірити вертикальність вимірювального каналу, поставивши рівень у циліндр 4 вимірювальної головки

(рис. 2.2). За необхідності гвинтами опорної плити встановити канал вертикально (рис. 2.1). Встановити за датчиком необхідну температуру. Протерти поверхню вимірювального каналу м'якою сухою ганчіркою. Ексцентриком 10 повернути затвор 13 і вставити сопло 11 в канал (рис. 2.2). Перевірити за допомогою дзеркала 10 (рис. 2.1) чи не перекриває затвор отвір сопла.

2. Увімкнути прилад в мережу і прогріти його протягом 1 год. Вимірювання починати після того, як задана температура зберігається без змін протягом 15 хв.

3. У вимірювальний канал завантажити досліджуваний матеріал і утримувати його, потім вставити поршень і через 2–3 хв видавити зайвий полімер крізь сопло за допомогою видавлювального пристрою, поки нижня позначка (проточка) на поршні не буде знаходитися вище краю циліндра на 1–2 мм. Матеріал і поршень прогріти у вимірювальному каналі протягом 10 хв. Під час прогрівання матеріалу під диск тримача вантажів на вимірювальну головку поставити упор. Після прогрівання полімеру упор прибрати.

4. Поставити на тримач перший вантаж і підвести кінець вимірювального індикатора до поверхні вантажу. Під дією маси вантажів полімер буде видавлюватися крізь сопло.

5. Заміряти час t опускання поршня до другої риски штока та масу полімерного зразка, що видавився за цей час. Дослід можна вважати вдалим, коли поршень опускається рівномірно й відношення маси зразка до часу опускання поршня не відрізняється більше, ніж на 5 %.

6. Температуру полімеру T , тип полімеру, розміри капіляра (діаметр d і довжину L), масу вантажів M , час опускання t і масу полімерного зразка m занести в журнал дослідів.

7. Видалити сопло і залишки полімеру, прочистити вимірювальний канал і поршень, вставити сопло і, змінивши масу вантажу, продовжувати дослід, починаючи з п. 3.

8. Досліди повторити (за пп. 3–7) за різних діаметрів капіляра.

9. Очистити установку від залишків полімеру.

Дослідження проводилися з такими полімерними матеріалами:

- полістирол марки ПС-С-1-3 (ГОСТ 20282-86);
- поліетилен високого тиску марки 15803-020 (ГОСТ 16337-77);
- севілен марки 11104-030 (ТУ 6-05-1636-97).

Також для дослідження впливу змащувальних речовин був застосований змащувальний агент Zell Chemia CWN-105 за масової концентрації змащувального агента 5 %.

2.2.1. Методика виявлення наявності та характеру пристінних ефектів у полімерному матеріалі

За характером утворення пристінних ефектів полімерні матеріали можна поділити на три типи:

- без наявності пристінних ефектів;
- з наявністю пристінної швидкості за рахунок ковзання по стінці;
- з наявністю пристінної швидкості за рахунок утворення пристінного низькомолекулярного шару.

Відсутність пристінних ефектів визначається інваріантністю кривих течії за різних радіусів каналів.

За наявності пристінних ефектів криві течії при дослідженнях на різних радіусах не збігаються між собою.

Визначення характеру утворення пристінних ефектів можна здійснити порівнянням ефективних швидкостей зсуву за різних довжин каналів однакового радіуса та виконання умови:

$$\tau_1 = \tau_2, \\ \frac{\Delta P_1 R}{2L_1} = \frac{\Delta P_2 R}{2L_2}.$$

При цьому перепади тиску в обох випадках відрізнятимуться.

За наявності низькомолекулярного пристінного шару, який має властивості, близькі до ньютонівських, зміна тиску не впливатиме на швидкість зсуву. За умови ковзання полімеру по стінці каналу зміна довжини каналу спричинить зміну ефективної швидкості зсуву, оскільки швидкість ковзання залежить від тиску.

Аналізуючи отримані дані, можливі два варіанти:

- при $\dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma}_2$ має місце утворення низькомолекулярного шару;
- при $\dot{\gamma}_1 \neq \dot{\gamma}_2$ має місце ковзання по стінці.

Таким чином, маємо два підходи до визначення пристінної швидкості.

2.2.2. Методика визначення параметрів матеріалу за умови його ковзання по стінці

Середньоінтегральна швидкість зсуву потоку, що безпосередньо може бути обчислена

$$\dot{\gamma}_{\text{сеп}} = \frac{1}{R} \int_0^R \dot{\gamma}_{\text{ст}} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} dr.$$

При цьому, враховуючи нелінійність течії, використовуємо поправку

Рабіновича (1.38) для пристінної швидкості зсуву

$$\dot{\gamma}_{\text{ст}} = \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3}. \quad (2.1)$$

Таким чином, середньоінтегральна швидкість зсуву потоку в цілому

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_{\text{сеп}} &= \frac{1}{R} \int_0^R \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} dr = \\ &= \frac{1}{R} \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3} \frac{nR}{n+1} = \frac{3n+1}{4(n+1)} \frac{4Q}{\pi R^3}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Середньоінтегральна швидкість зсуву $\dot{\gamma}_{\text{сеп}}$ представляє собою суму істинної швидкості зсуву в основному потоці $\dot{\gamma}_{\text{іст}}$ та швидкості зсуву на стінці $\dot{\gamma}_{\text{ст}}$

$$\dot{\gamma}_{\text{сеп}} = \dot{\gamma}_{\text{ст}} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}. \quad (2.3)$$

Підставивши (2.1) та (2.2) у (2.3), отримаємо

$$\frac{3n+1}{4(n+1)} \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}.$$

Враховуючи, що швидкість потоку визначається як

$$v = \frac{Q}{\pi R^2}. \quad (2.4)$$

Отримаємо залежність, що має вигляд

$$\frac{3n+1}{4(n+1)} \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{3n+1}{n} v_{\text{ст}} \frac{1}{R} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}. \quad (2.5)$$

При побудові графіку залежності $\dot{\gamma}_{\text{сеп}}$ від $1/R$ отримуємо лінійну залежність, тангенс куту нахилу якої

$$\text{tg} \alpha = \frac{3n+1}{n} v_{\text{ст}},$$

звідки

$$v_{\text{ст}} = \frac{n}{3n+1} \text{tg} \alpha. \quad (2.6)$$

Отримане рівняння дозволяє обчислювати швидкість розплаву полімерного матеріалу на стінці за умови проковзування по ній.

2.2.3. Методика визначення параметрів матеріалу за умови утворення низькомолекулярного шару

Середньоінтегральна швидкість зсуву потоку, що безпосередньо може бути обчислена

$$\dot{\gamma}_{\text{сеп}} = \frac{1}{R} \int_0^R \dot{\gamma}_{\text{ст}} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} dr.$$

Швидкість зсуву на стінці з припущенням властивостей низькомолекулярного шару, близьких до ньютонівських

$$\dot{\gamma}_{\text{ст}} = \frac{4Q}{\pi R^3}. \quad (2.7)$$

Таким чином, середньоінтегральна швидкість зсуву потоку в цілому

$$\dot{\gamma}_{\text{сеп}} = \frac{1}{R} \int_0^R \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} dr = \frac{1}{R} \frac{4Q}{\pi R^3} \frac{nR}{n+1} = \frac{n}{n+1} \frac{4Q}{\pi R^3}. \quad (2.8)$$

Підставивши (2.7) та (2.8) у (2.3), отримаємо

$$\frac{n}{n+1} \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4Q}{\pi R^3} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}.$$

Враховуючи (2.4) отримаємо залежність, що має вигляд

$$\frac{n}{n+1} \frac{4Q}{\pi R^3} = 4v_{\text{ст}} \frac{1}{R} + \dot{\gamma}_{\text{іст}}. \quad (2.9)$$

При побудові графіку залежності $\dot{\gamma}_{\text{сеп}}$ від $1/R$ отримуємо лінійну залежність, тангенс куту нахилу якої

$$\text{tg} \alpha = 4v_{\text{ст}},$$

звідки

$$v_{\text{ст}} = \frac{\text{tg} \alpha}{4}. \quad (2.10)$$

Отримане рівняння дозволяє обчислювати швидкість розплаву полімерного матеріалу на стінці за умови утворення на ній низькомолекулярного пристінного шару.

2.3. Розрахунок похибок дослідження

2.3.1. Методика розрахунку похибок прямих вимірювань

Визначення похибки середнього результату вимірювань (як прямих, так і непрямих) фізичних величин здійснюється за методикою, наведеною в праці [101].

Так, похибку середнього результату прямих вимірювань фізичних величин обчислюємо в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату вимірювань фізичної величини \bar{x} визначають за залежністю

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2}, \quad (2.11)$$

де $\sigma_{\text{пвп}}$, $\sigma_{\text{пр}}$, $\sigma_{\text{окр}}$ – похибки первинного вимірювального перетворювача, приладу та округлення, відповідно:

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3}, \quad (2.12)$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_0}{100} D_{\text{вим}} \right), \quad (2.13)$$

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}}. \quad (2.14)$$

де $\Delta_{\text{дпп}}$ – довідникова похибка приладу; γ_0 – клас точності приладу; $D_{\text{вим}}$ – діапазон вимірювання приладу; C – ціна поділки шкали (ступінь дискретизації цифрового відліку) приладу.

Випадкова помилка середнього результату становить

$$\theta(\bar{x}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (2.15)$$

де x_i – i -й результат вимірювання; ξ – коефіцієнт Стюдента, який залежить від довірчої імовірності P_d і кількості вимірювань n .

Повна похибка прямого вимірювання фізичної величини обчислюється за формулою

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{дін}}^2(\bar{x}) + \theta^2(\bar{x})}, \quad (2.16)$$

а значення фізичної величини становитиме

$$x = \bar{x} \pm \sigma(\bar{x}). \quad (2.17)$$

2.3.2. Методика розрахунку похибок непрямих вимірювань

Похибку середнього результату непрямих вимірювань фізичних величин виконуємо в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату непрямих вимірювань фізичної величини \bar{x} визначають за формулою

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{x}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(x_1) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_k}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(x_k)}, \quad (2.18)$$

де $x = F(x_1, x_2, \dots, x_k)$ – залежність шуканої величини x від величин x_i ($i = \overline{1, n}$), що вимірюють безпосередньо.

Випадкова помилка середнього результату в цьому разі становить

$$\theta(\bar{x}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \theta^2(x_1) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \theta^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_k}\right)^2 \theta^2(x_k)}. \quad (2.19)$$

Остаточно повну похибку непрямого вимірювання фізичної величини з урахуванням (2.18) і (2.19) визначають за залежністю (2.16), а значення фізичної величини – за залежністю (2.17).

2.3.3. Розрахунок похибки вимірювання температури

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (2.12) дорівнює

$$\sigma_{\text{пп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{2,5}{3} = \pm 0,833 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де $\Delta_{\text{дпп}}$ – довідникова похибка хромель-алюмелевої термопари:

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

Похибка приладу згідно з (2.13) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,5}{100} \cdot (1300 - (-50)) \right) = 2,25 \text{ } ^\circ\text{C},$$

Похибка округлення згідно з (2.14) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,289 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.11):

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,833^2 + 2,25^2 + 0,289^2} = 2,417 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання температури. Для визначення випадкової похибки проводили чотири вимірювання температури, які становили 219; 220; 220; 219 і 220 °С.

Середнє арифметичне температури становить

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = \frac{1}{5} (219 + 220 + 220 + 219 + 220) = 219,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\begin{aligned} \theta(\bar{T}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{T} - T_i)^2} = \\ &= 2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(219 - 219,6)^2 + (220 - 219,6)^2 + (220 - 219,6)^2 + (219 - 219,6)^2 + (220 - 219,6)^2]} = \\ &= 0,348 \text{ } ^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

де $\xi=2,6$ – значення коефіцієнта Стюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$ [101].

Повна похибка прямого вимірювання температури (2.16)

$$\sigma(\bar{T}) = \sqrt{2,417^2 + 0,348^2} = 2,442 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значення температури відповідно до (2.17) становить

$$T = \bar{T} \pm \sigma(\bar{T}) = \bar{T} \pm 2,422 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2.3.4. Розрахунок похибки вимірювання маси

Похибка зважування згідно з (2.12) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{0,0004}{3} = \pm 0,00013 \text{ г},$$

де довідникова похибка приладу ТВЕ-0,3-0,005 становить:

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 0,0004 \text{ г}.$$

Похибка приладу згідно з (2.13) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,004}{100} \cdot (300 - 0,1) \right) = 0,004 \text{ г}.$$

Похибка округлення згідно з (2.14) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,005}{\sqrt{12}} = 0,0014 \text{ г.}$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.11):

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,00013^2 + 0,004^2 + 0,0014^2} = 0,0042 \text{ г.}$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання ваги. Для визначення випадкової похибки проводили чотири вимірювання маси, які становили 1,000; 0,995; 0,995; 1,000 і 1,000 г.

Середнє арифметичне ваги становить

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i = \frac{1}{5} (1,000 + 0,995 + 0,995 + 1,000 + 1,000) = 0,998 \text{ г.}$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\begin{aligned} \theta(\bar{m}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{m} - m_i)^2} = \\ &= 2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(1-0,998)^2 + (0,995-0,998)^2 + (0,995-0,998)^2 + (1-0,998)^2 + (1-0,998)^2]} = \\ &= 0,0071 \text{ г,} \end{aligned}$$

де $\xi=2,6$ – значення коефіцієнта Стьюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$ [101].

Повна похибка прямого вимірювання маси (2.16)

$$\sigma(\bar{m}) = \sqrt{0,0042^2 + 0,0071^2} = 0,0082 \text{ г.}$$

Значення маси відповідно до (2.17) становить

$$m = \bar{m} \pm \sigma(\bar{m}) = \bar{m} \pm 0,0082 \text{ г.}$$

У більшості вимірювань фізичних величин значення випадкової помилки їх середнього результату значно менше від значення дослідно-інструментальної помилки, тому надалі для визначення повної похибки прямого вимірювання фізичних величин братимемо до уваги тільки дослідно-інструментальну помилку, тобто приймаємо, що $\sigma(\bar{x}) = \sigma_{\text{дін}}(\bar{x})$.

2.3.5. Розрахунок похибки вимірювання часу

Похибка вимірювання часу згідно з (2.12) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дін}}}{3} = \pm \frac{1 \cdot 10^{-5}}{3} = \pm 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ с,}$$

де довідникова похибка приладу «Інтеграл С-01» становить

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 1 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Похибка приладу згідно з (2.13) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{10^{-3}}{100} \cdot 1 \right) = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Похибка округлення згідно з (2.14) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,01}{\sqrt{12}} = 0,0029 \text{ с.}$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.11):

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{t}) = \sqrt{\sigma_{\text{ппп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,00000333^2 + 0,00000333^2 + 0,0029^2} = 0,0029 \text{ с.}$$

Тепер визначимо величину суб'єктивної похибки. Середній час реакції людини на зоровий подразник близько 0,2 с (враховуючи час запуску і зупинки секундоміру, суб'єктивна похибка складає – $\sigma_{\text{суб}} = 0,4 \text{ с.}$)

Повна похибка прямого вимірювання ваги (2.16)

$$\sigma(\bar{t}) = \sqrt{0,4^2 + 0,0029^2} = 0,4 \text{ с.}$$

Значення ваги відповідно до (2.17) становить

$$t = \bar{t} \pm \sigma(\bar{t}) = \bar{t} \pm 0,4 \text{ с.}$$

2.3.6. Розрахунок похибки непрямих вимірювань швидкості зсуву

Швидкість зсуву полімеру визначається

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q_v}{\pi R^3} = \frac{4Q_m}{\pi R^3 \rho} = \frac{4m}{\pi R^3 \rho t} = \frac{4m}{3,14 \cdot 0,001^3 \cdot 950t} = 1,34 \cdot 10^6 \frac{m}{t}.$$

Визначимо частинні похідні від параметрів, що впливають на швидкість зсуву

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial m} &= \frac{1,34 \cdot 10^6}{t}, \\ \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial t} &= -\frac{1,34 \cdot 10^6 \cdot m}{t^2}. \end{aligned}$$

Дослідно-інструментальна помилка середнього результату непрямих

вимірювань фізичної величини за (2.18)

$$\sigma_{\text{дін}}(\dot{\bar{\gamma}}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial m}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(m) + \left(\frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial t}\right)^2 \sigma_{\text{дін}}^2(t)} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1,34 \cdot 10^6}{t}\right)^2 \cdot (0,0042 \cdot 10^{-3})^2 + \left(-\frac{1,34 \cdot 10^6 \cdot m}{t^2}\right)^2 \cdot 0,0029^2} = 0,476 \text{ с}^{-1}.$$

Випадкова помилка середнього результату за (2.19)

$$\theta(\dot{\bar{\gamma}}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial m}\right)^2 \theta^2(m) + \left(\frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial t}\right)^2 \sigma_{\text{суб}}^2(t)} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1,34 \cdot 10^6}{t}\right)^2 \cdot (0,0071 \cdot 10^{-3})^2 + \left(-\frac{1,34 \cdot 10^6 \cdot m}{t^2}\right)^2 \cdot 0,4^2} = 0,398 \text{ с}^{-1}.$$

Повна похибка визначення швидкості зсуву за (2.16)

$$\sigma(\dot{\bar{\gamma}}) = \sqrt{\sigma_{\text{дін}}^2(\dot{\bar{\gamma}}) + \theta^2(\dot{\bar{\gamma}})} = \sqrt{0,476^2 + 0,398^2} = 0,62 \text{ с}^{-1}.$$

Відносна похибка вимірювань

$$\varepsilon(\dot{\bar{\gamma}}) = \frac{\sigma(\dot{\bar{\gamma}})}{\dot{\bar{\gamma}}} 100 \% = \frac{0,62}{20} 100 \% = 3,1 \ \%.$$

Значення швидкості зсуву становить

$$\dot{\gamma} = \dot{\bar{\gamma}} \pm \varepsilon(\dot{\bar{\gamma}}) = \dot{\bar{\gamma}} \pm 3,1 \ \% . \quad (2.20)$$

Встановлена похибка є критерієм для визначення граничної величини відхилення значень швидкості зсуву при визначенні характеру пристінних ефектів у розплаві полімеру. Методика визначення характеру пристінних ефектів наведена в п. 2.2.1.

2.4. Визначення характеру, величини пристінних ефектів та параметрів матеріалу

Використовуючи методики, описані в п. 2.2, було здійснено обробку експериментальних даних для всіх досліджуваних матеріалів з метою визначення характеру та величини пристінних ефектів.

2.4.1. Поліетилен високого тиску 15803-020

Виходячи з даних, отриманих дослідженням течії ПЕВТ 15803-020 згідно

з ГОСТ 11645-73 на семи діаметрах капілярів за різних напружень зсуву побудовано залежність напруження зсуву від швидкості зсуву (рис. 2.6).

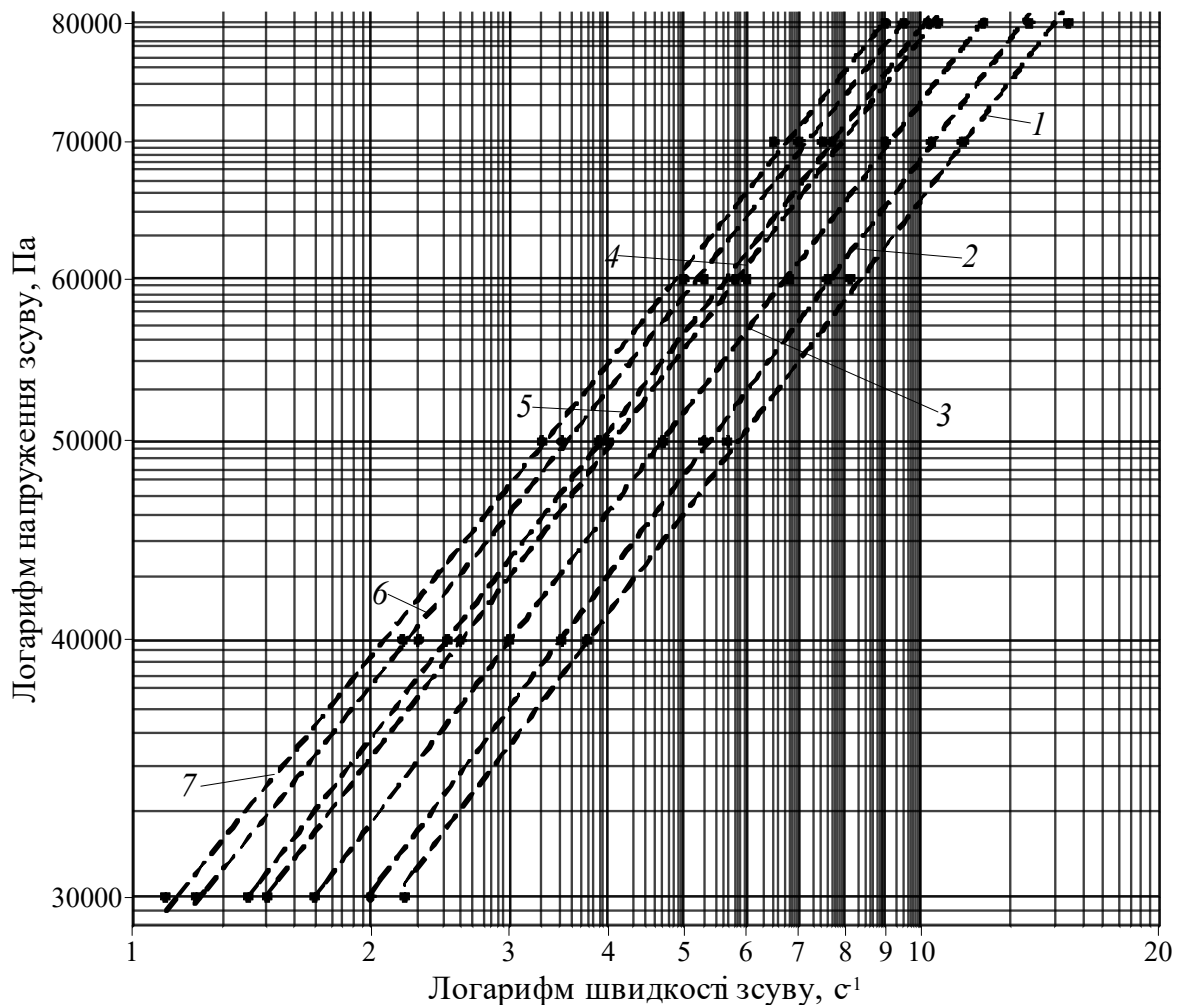


Рис. 2.6. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву за різного діаметра каналу, мм:
1 – 1; 2 – 1,18; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 2,095; 6 – 2,5; 7 – 3

З рис. 2.6 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не збігаються. Неінваріантний характер кривих залежності згідно з п. 2.2.1 свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів згідно з методикою, наведеною у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час досліду з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами за постійного напруження зсуву (табл. Таблица 2.5).

Таблица 2.5

$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	0,83

2,095	16	2,4	10781	0,87
-------	----	-----	-------	------

Як видно з табл. Таблиця 2.5, швидкості зсуву відрізняються більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про ковзання ПЕВТ 15803-020 по стінці, тому застосовуємо методику, описану у п. 2.2.2.

За даними графіка, наведеного на рис. 2.6, визначається індекс течії ПЕВТ 15803-020

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,492.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.2) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, за різних значень напруження зсуву (рис. 2.7).

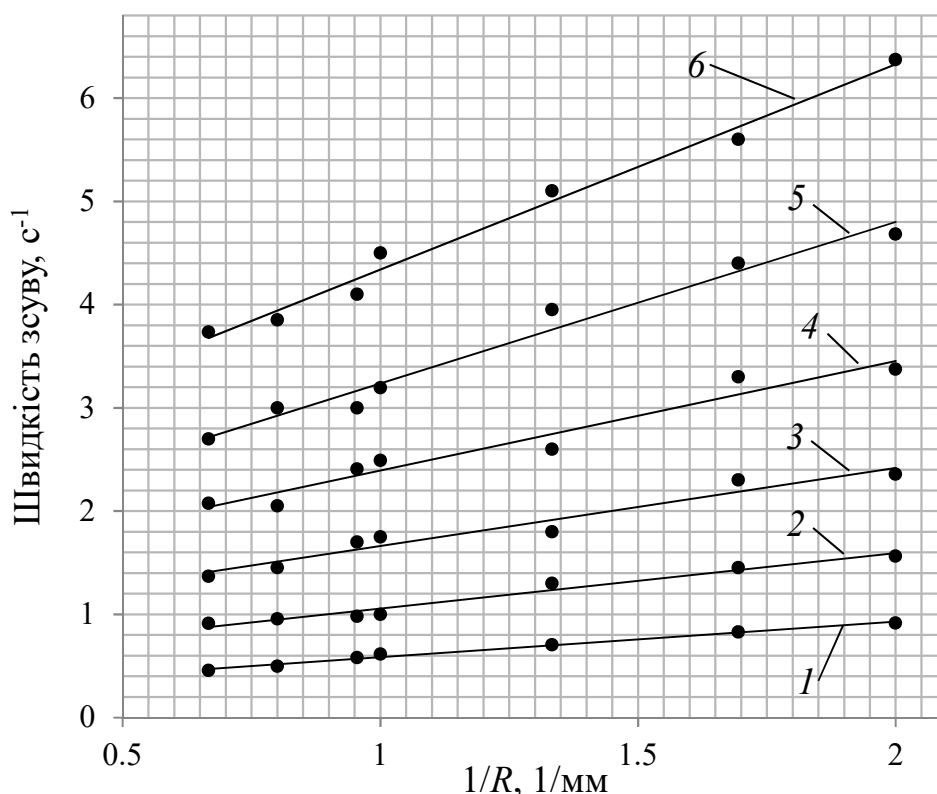


Рис. 2.7. Залежність швидкості зсуву ПЕВТ 15803-020 від $1/R$ за різних напружень зсуву, МПа: 1 – 0,03; 2 – 0,04; 3 – 0,05; 4 – 0,06; 5 – 0,07; 6 – 0,08

Виконавши лінійну апроксимацію точок, наведених на рис. 2.7, отримаємо такі вирази:

$$\begin{aligned}\dot{\gamma} &= 0,344 \frac{1}{R} + 0,242, \text{ при } \tau=0,03 \text{ МПа}; \\ \dot{\gamma} &= 0,5106 \frac{1}{R} + 0,5613, \text{ при } \tau=0,04 \text{ МПа}; \\ \dot{\gamma} &= 0,7632 \frac{1}{R} + 0,8794, \text{ при } \tau=0,05 \text{ МПа}; \\ \dot{\gamma} &= 0,9881 \frac{1}{R} + 1,4524, \text{ при } \tau=0,06 \text{ МПа}; \\ \dot{\gamma} &= 1,509 \frac{1}{R} + 1,6926, \text{ при } \tau=0,07 \text{ МПа}; \\ \dot{\gamma} &= 1,9776 \frac{1}{R} + 2,3698, \text{ при } \tau=0,08 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

З наведених виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.5), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкості на стінці каналу виходячи з (2.6), що наведена на рис. 2.8.

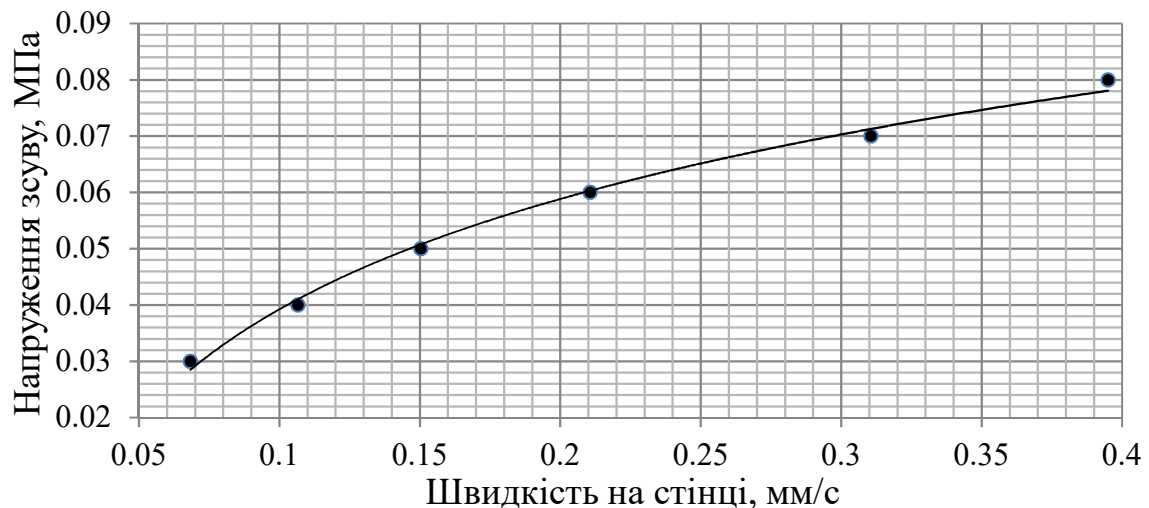


Рис. 2.8. Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПЕВТ 15803-020

Як видно з рис. 2.8, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується виразом

$$\tau = 8,196 \cdot 10^6 v_{\text{КОВЗ}}^{0,581},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.2. Поліетилен високого тиску з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105

Виходячи з даних, отриманих дослідженням течії ПЕВТ 15803-020 зі

змащувальним агентом на семи діаметрах капілярів за різних напружень зсуву побудовано залежність напруження зсуву від швидкості зсуву (рис. 2.9).

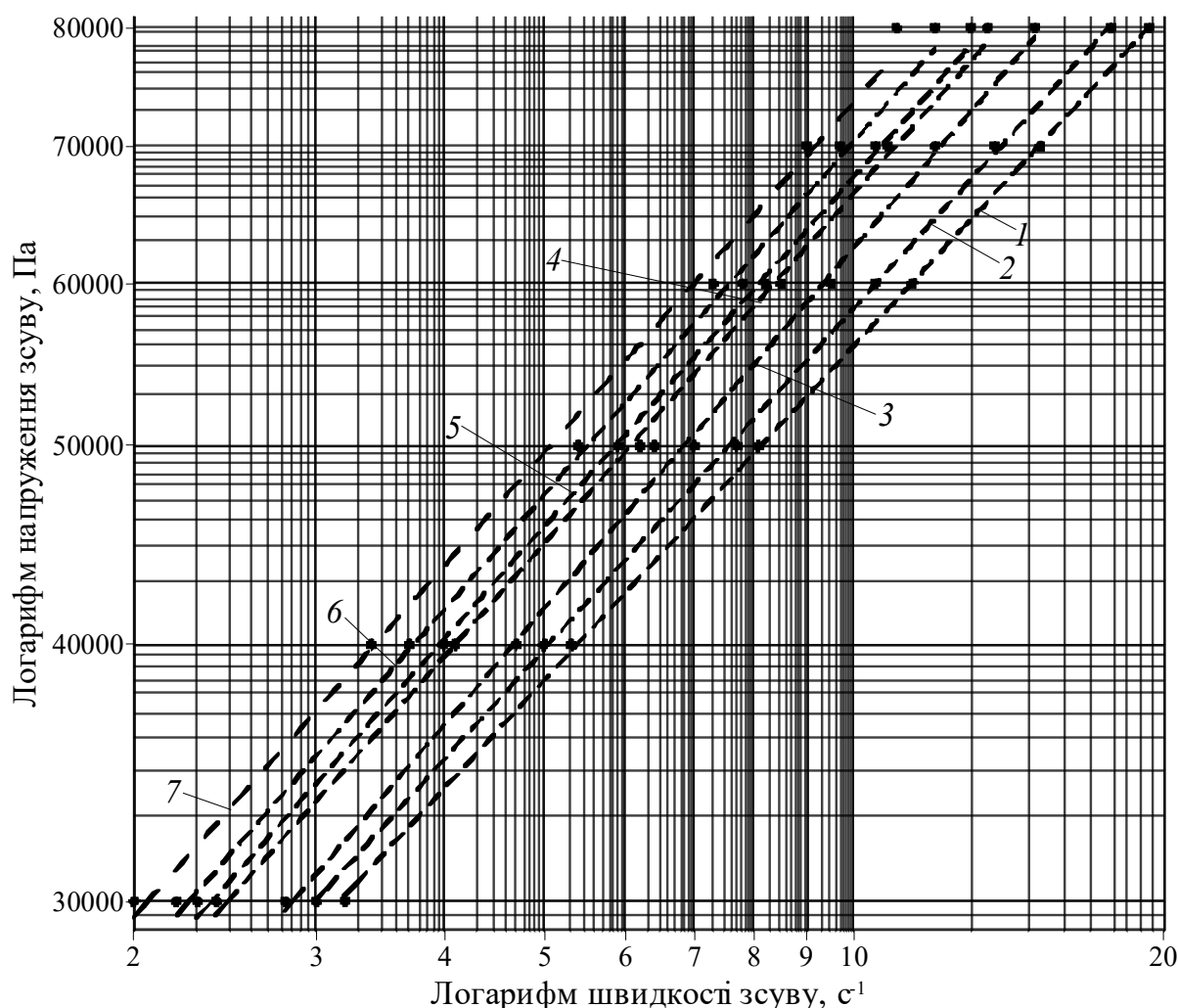


Рис. 2.9. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву за різного діаметра каналу, мм:
1 – 1; 2 – 1,18; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 2,095; 6 – 2,5; 7 – 3

З рис. 2.9 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не збігаються. Неінваріантний характер кривих залежності згідно з п. 2.2.1 свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів згідно з методикою, наведеною у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час досліду з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами за постійного напруження зсуву (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	1,05

2,095	16	2,4	10781	1,06
-------	----	-----	-------	------

Як видно з табл. 2.6, швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику, описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, наведеного на рис. 2.9, визначається індекс течії ПЕВТ 15803-020 зі змащувальним агентом

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,555.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, за різних напружень зсуву (рис. 2.10).

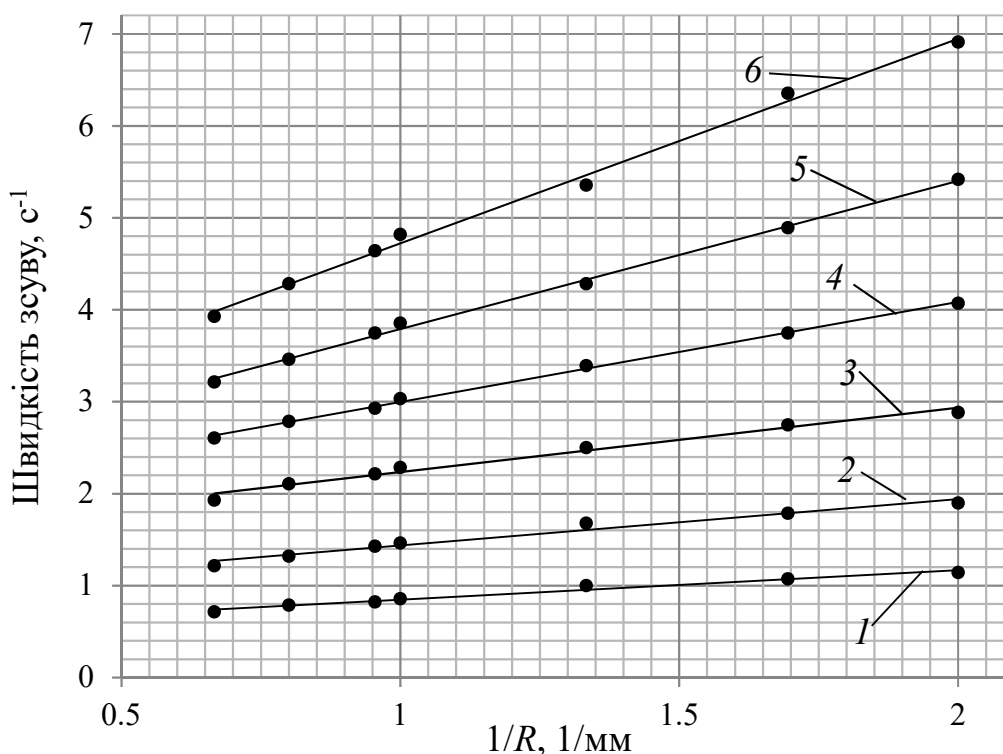


Рис. 2.10. Залежність швидкості зсуву ПЕВТ 15803-020 зі змащувальним агентом від $1/R$ за різних напружень зсуву, МПа: 1 – 0,03; 2 – 0,04; 3 – 0,05; 4 – 0,06; 5 – 0,07; 6 – 0,08

Виконавши лінійну апроксимацію точок, наведених на рис. 2.10, отримаємо такі вирази:

$$\dot{\gamma} = 0,3207 \frac{1}{R} + 0,5255, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,5053 \frac{1}{R} + 0,9309, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,6996 \frac{1}{R} + 1,5356, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 1,0879 \frac{1}{R} + 1,9092, \text{ при } \tau = 0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 1,612 \frac{1}{R} + 2,178, \text{ при } \tau = 0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 2,2252 \frac{1}{R} + 2,4974, \text{ при } \tau = 0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених вище виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкості на стінці каналу виходячи з (2.10), що наведена на рис. 2.11.

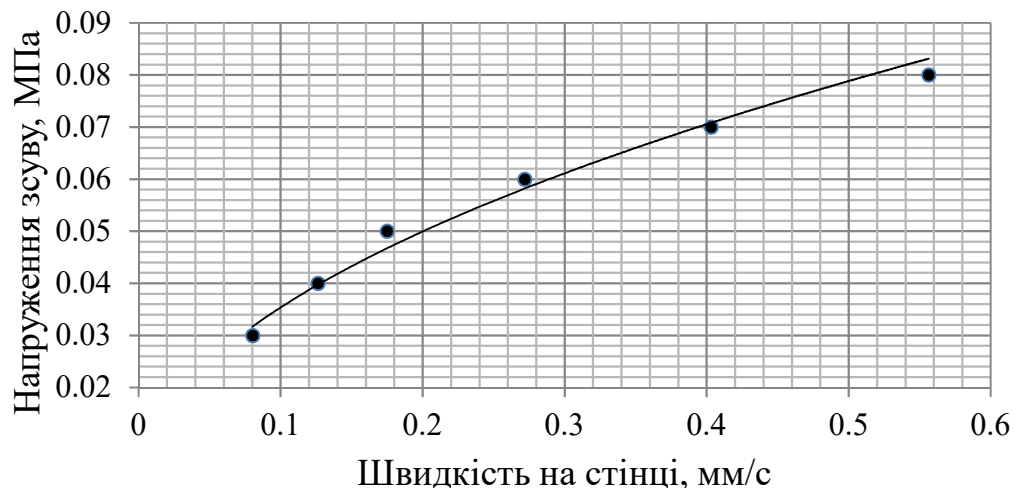


Рис. 2.11. Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПЕВТ 15803-020 зі змащувальним агентом

Як видно з рис. 2.11, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується виразом

$$\tau = 4,275 \cdot 10^6 v_{\text{КОВЗ}}^{0,522},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.3. Севілен 11104-030

Виходячи з даних, отриманих дослідженням течії севілену 11104-030 на семи діаметрах капілярів за різних напружень зсуву побудовано залежність

напруження зсуву від швидкості зсуву (рис. 2.12).

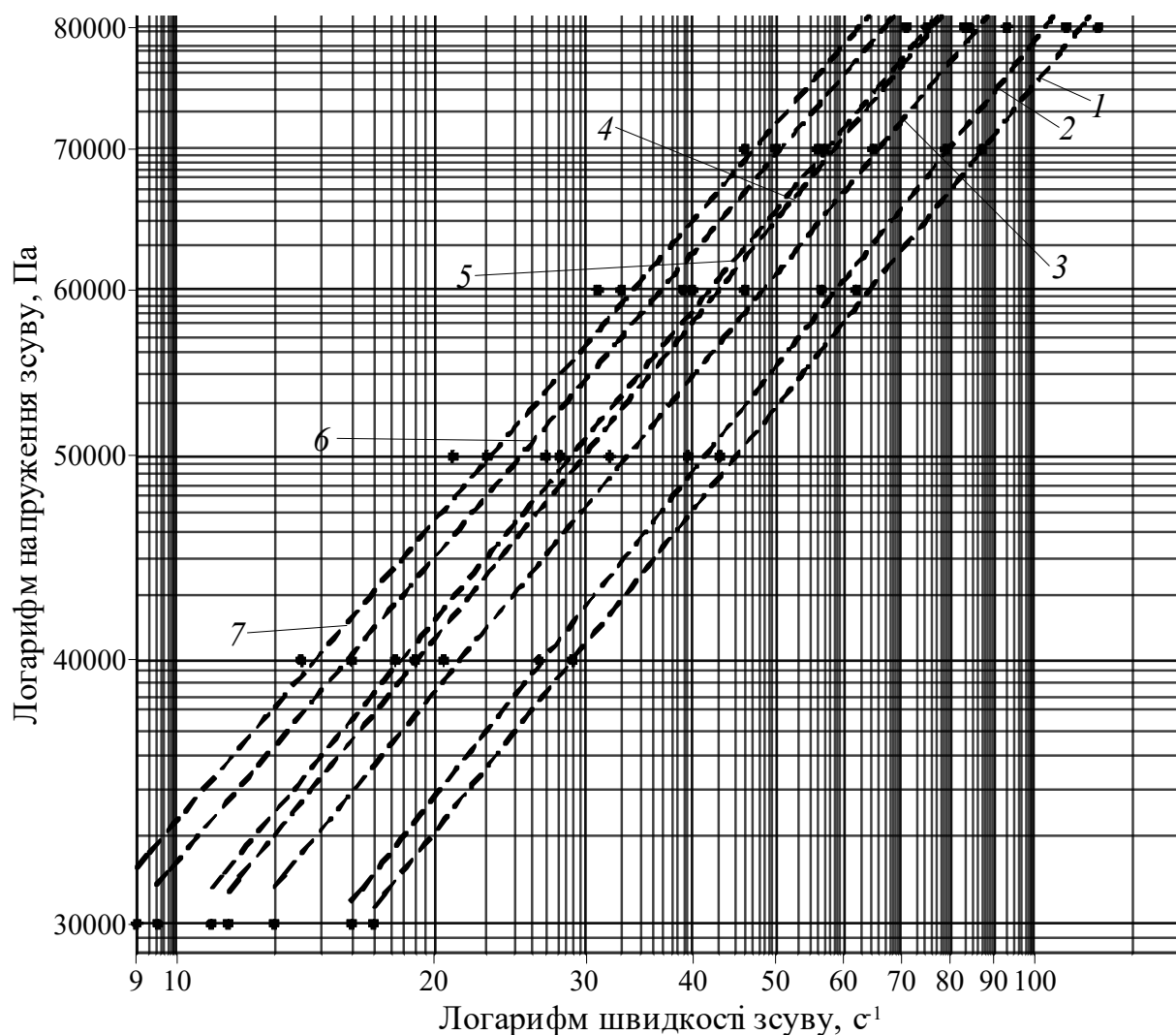


Рис. 2.12. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву за різного діаметра каналу, мм:
1 – 1; 2 – 1,18; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 2,095; 6 – 2,5; 7 – 3

З рис. 2.12 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не збігаються. Неінваріантний характер кривих залежності згідно з п. 2.2.1 свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів згідно з методикою, наведеною у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час досліду з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами за постійного напруження зсуву (табл. 2.7).

Таблиця 2.7

$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	5,91

2,095	16	2,4	10781	5,95
-------	----	-----	-------	------

Як видно з табл. 2.7, швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику, описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, наведеного на рис. 2.12, визначається індекс течії севілену 11104-030

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,49.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, за різних напружень зсуву (рис. 2.13).

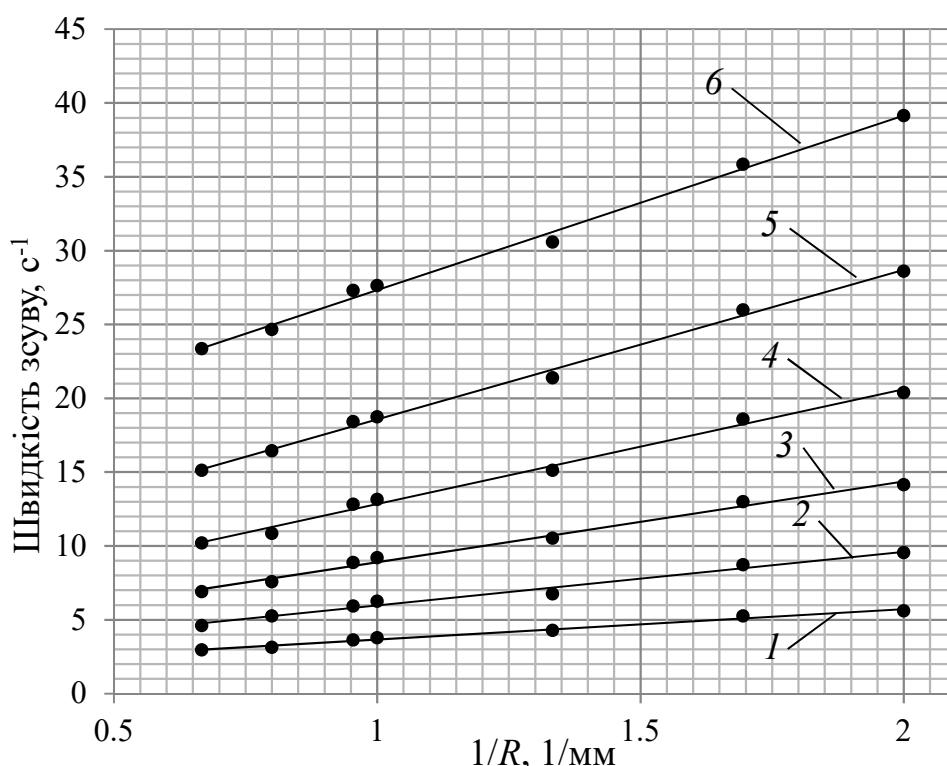


Рис. 2.13. Залежність швидкості зсуву севілену 11104-030 від $1/R$ за різних напружень зсуву, МПа: 1 – 0,03; 2 – 0,04; 3 – 0,05; 4 – 0,06; 5 – 0,07; 6 – 0,08

Виконавши лінійну апроксимацію точок, наведених на рис. 2.13, отримаємо такі вирази:

$$\dot{\gamma} = 2,0538 \frac{1}{R} + 1,6071, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 3,6256 \frac{1}{R} + 2,3417, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 5,4725 \frac{1}{R} + 3,4244, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 7,7764 \frac{1}{R} + 5,0596, \text{ при } \tau = 0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 10,131 \frac{1}{R} + 8,4424, \text{ при } \tau = 0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 11,824 \frac{1}{R} + 15,513, \text{ при } \tau = 0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкості на стінці каналу виходячи з (2.10), що наведена на рис. 2.14.

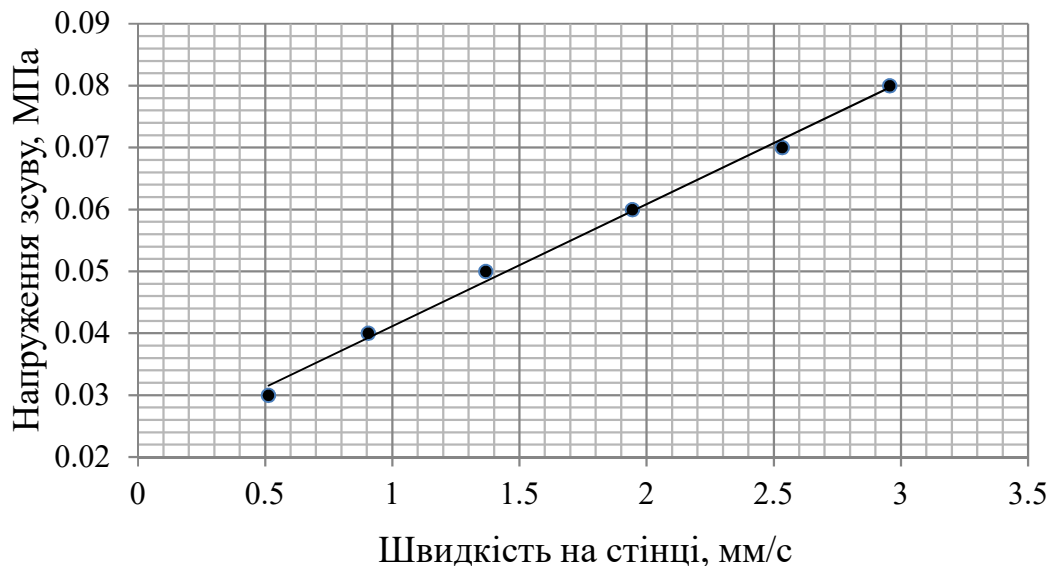


Рис. 2.14. Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для севілену 11104-030

Як видно з рис. 2.14, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має лінійний характер та описується виразом

$$\tau = 1,973 \cdot 10^7 + 2,14 \cdot 10^4 v_{\text{КОВЗ}},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.4. Севілен 11104-030 з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105

Виходячи з даних, отриманих дослідженням течії севілену 11104-030 зі

змащувальним агентом на семи діаметрах капілярів за різних напружень зсуву побудовано залежність напруження зсуву від швидкості зсуву (рис. 2.15).

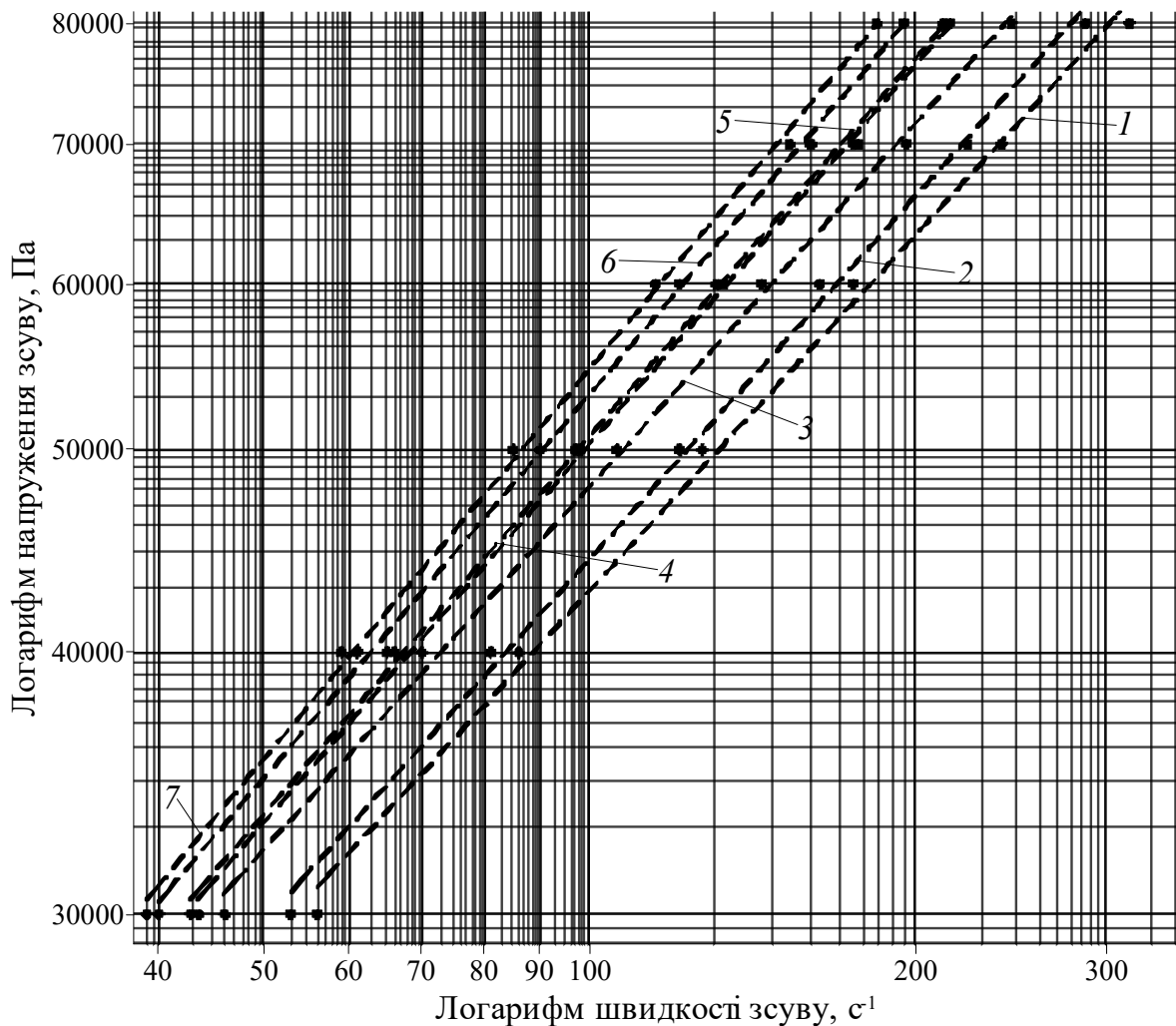


Рис. 2.15. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву за різного діаметра каналу, мм:
1 – 1; 2 – 1,18; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 2,095; 6 – 2,5; 7 – 3

З рис. 2.15 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не збігаються. Неінваріантний характер кривих залежності згідно з п. 2.2.1 свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів згідно з методикою, наведеною у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час досліду з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами за постійного напруження зсуву (табл. 2.8).

Таблиця 2.8

$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	11,6

2,095	16	2,4	10781	11,67
-------	----	-----	-------	-------

Як видно з табл. 2.8, швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику, описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, наведеного на рис. 2.15, визначається індекс течії севілену 11104-030 зі змащувальним агентом

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,593.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, за різних напружень зсуву (рис. 2.16).

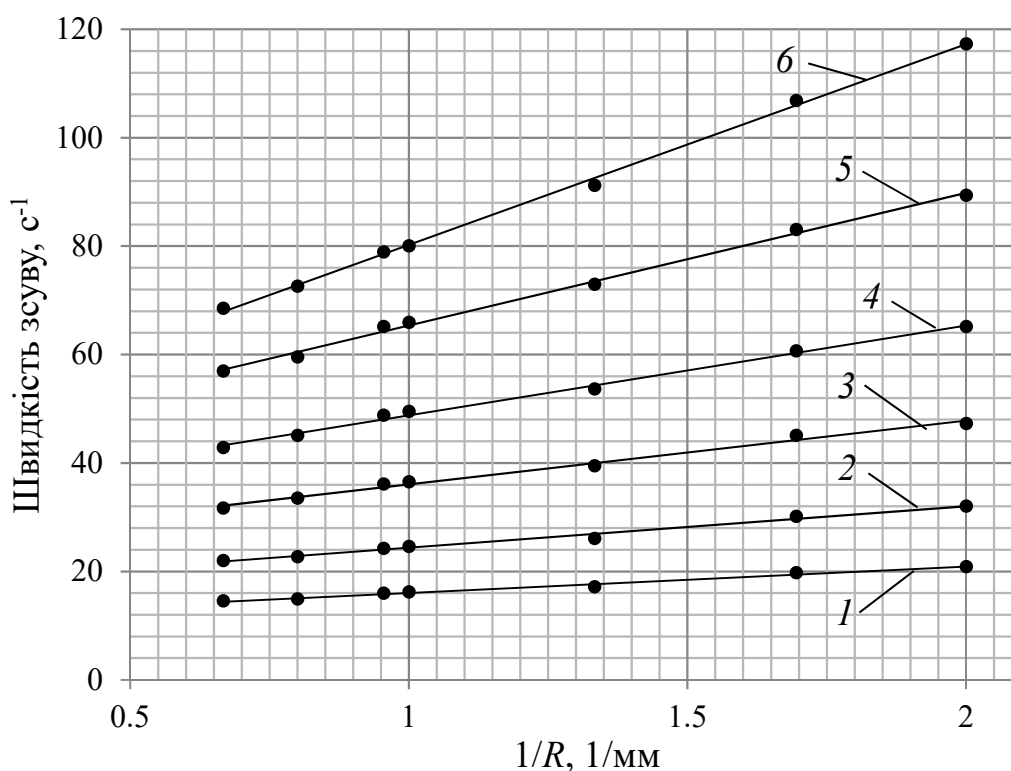


Рис. 2.16. Залежність швидкості зсуву севілену 11104-030 зі змащувальним агентом від $1/R$ за різних напружень зсуву, МПа: 1 – 0,03; 2 – 0,04; 3 – 0,05; 4 – 0,06; 5 – 0,07; 6 – 0,08

Виконавши лінійну апроксимацію точок, наведених на рис. 2.17, отримаємо такі вирази:

$$\dot{\gamma} = 4,8609 \frac{1}{R} + 11,166, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 7,6538 \frac{1}{R} + 16,713, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 11,772 \frac{1}{R} + 24,292, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 16,579 \frac{1}{R} + 32,21, \text{ при } \tau = 0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 24,488 \frac{1}{R} + 40,85, \text{ при } \tau = 0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 37,008 \frac{1}{R} + 43,234, \text{ при } \tau = 0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених вище виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкості на стінці каналу виходячи з (2.10), що наведена на рис. 2.17.

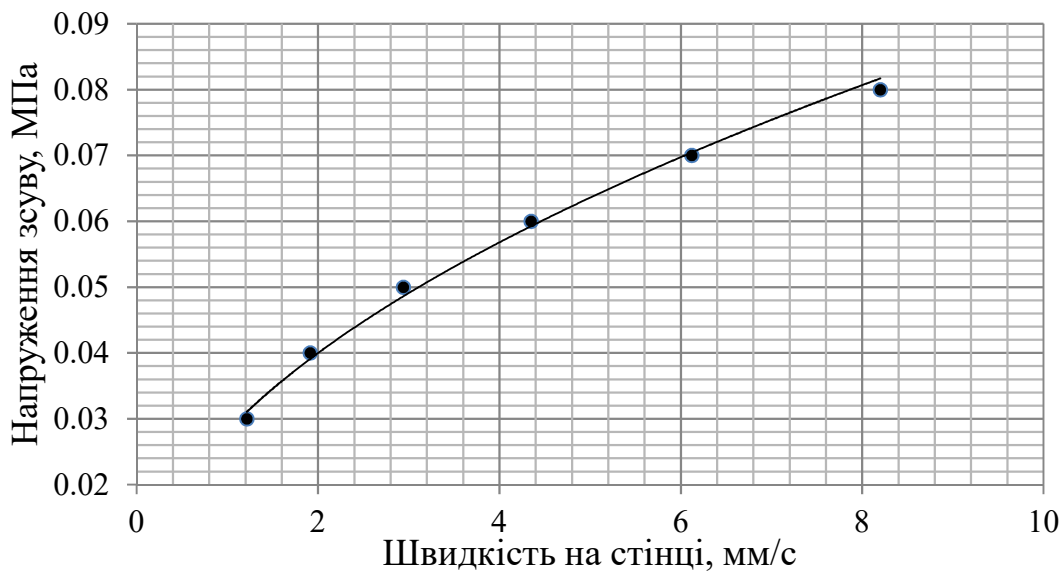


Рис. 2.17. Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для севілену 11104-030 зі змащувальним агентом

Як видно з рис. 2.17, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується виразом

$$\tau = 9,296 \cdot 10^5 \gamma_{\text{КОВЗ}}^{0,506},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.5. Полістирол марки ПС-С-1-3

Виходячи з даних, отриманих дослідженням течії ПС-С-1-3 на семи діаметрах капілярів за різних напружень зсуву, побудовано залежність

напруження зсуву від швидкості зсуву (рис. 2.18).

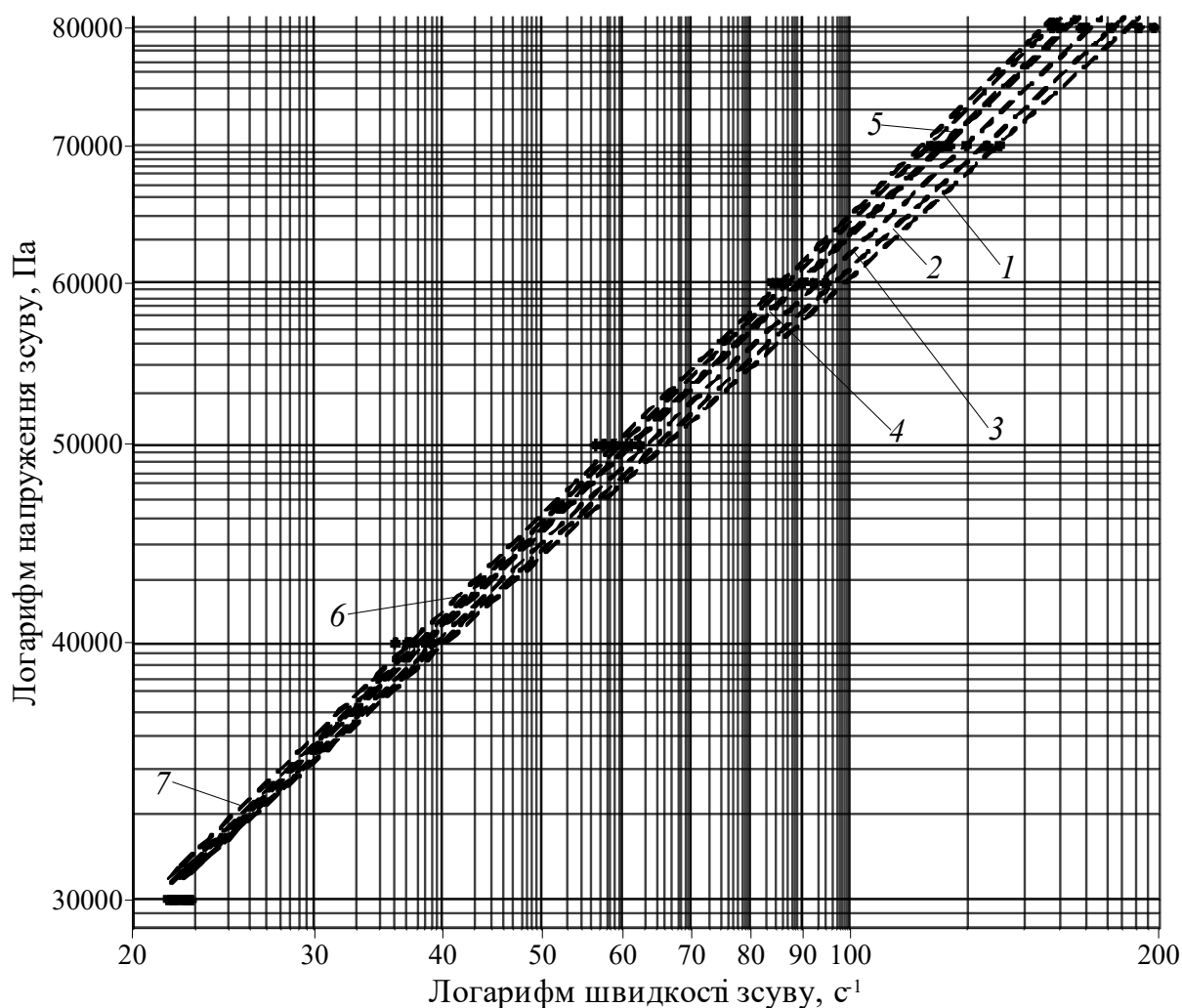


Рис. 2.18. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву за різного діаметра каналу, мм:
1 – 1; 2 – 1,18; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 2,095; 6 – 2,5; 7 – 3

З рис. 2.18 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не збігаються. Неінваріантний характер кривих залежності згідно з п. 2.2.1 свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів згідно з методикою, наведеною у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час досліду з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами за постійного напруження зсуву (табл. 2.9).

Таблиця 2.9

$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	8,26

2,095	16	2,4	10781	8,72
-------	----	-----	-------	------

Як видно з табл. 2.9, швидкості зсуву відрізняються більше ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про ковзання ПС-С-1-3 по стінці, тому застосовуємо методику, описану у п. 2.2.2.

За даними графіка, наведеного на рис. 2.18, визначається індекс течії ПС-С-1-3

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,469.$$

Виходячи з експериментальних даних, побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.2) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, за різних напружень зсуву (рис. 2.19).

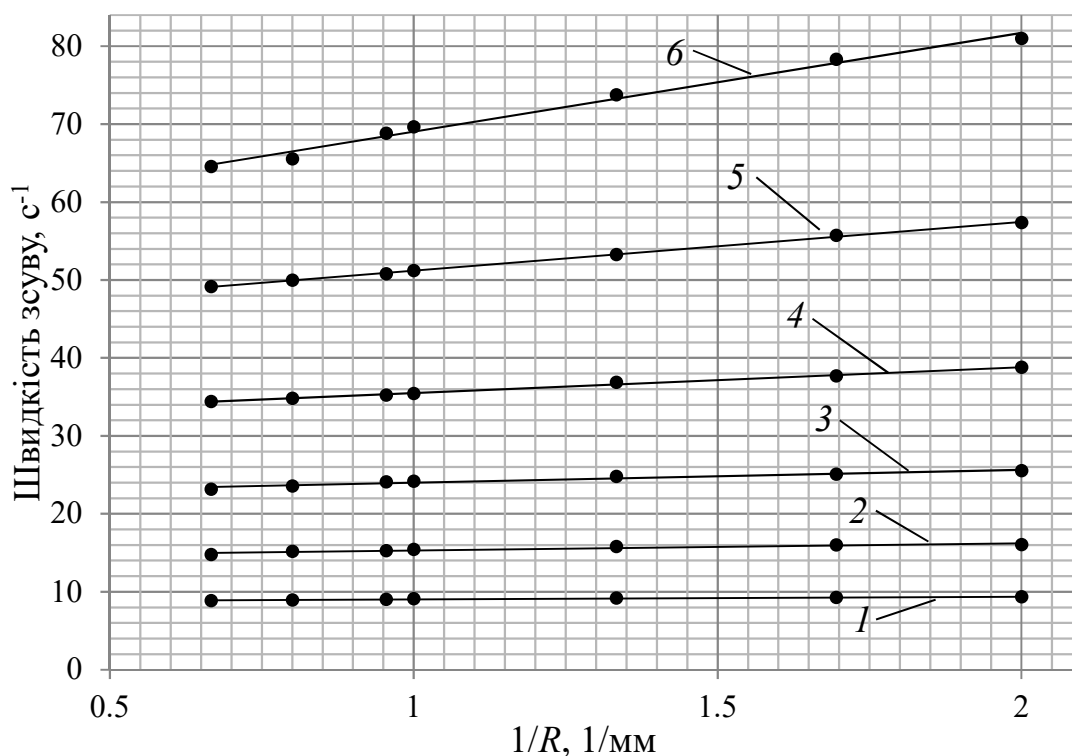


Рис. 2.19. Залежність швидкості зсуву ПС-С-1-3 від $1/R$ за різних напружень зсуву, МПа:
1 – 0,03; 2 – 0,04; 3 – 0,05; 4 – 0,06; 5 – 0,07; 6 – 0,08

Виконавши лінійну апроксимацію точок, наведених на рис. 2.19, отримаємо такі вирази:

$$\dot{\gamma} = 0,3395 \frac{1}{R} + 8,6815, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,9135 \frac{1}{R} + 14,372, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 1,6565 \frac{1}{R} + 22,33, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 3,3073 \frac{1}{R} + 32,182, \text{ при } \tau = 0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 6,2469 \frac{1}{R} + 44,951, \text{ при } \tau = 0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 12,69 \frac{1}{R} + 56,33, \text{ при } \tau = 0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених вище виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.5), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкості на стінці каналу виходячи з (2.6), що наведена на рис. 2.20.

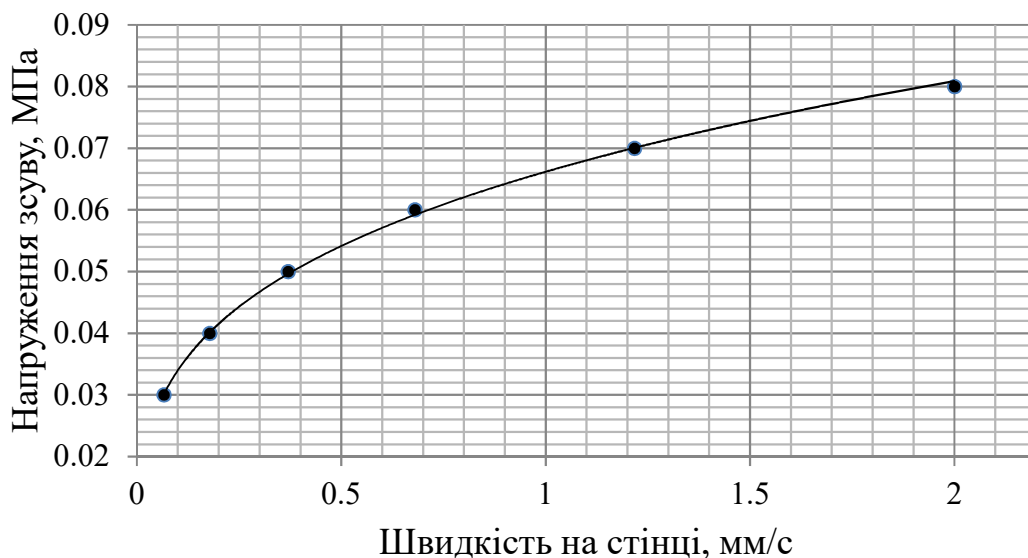


Рис. 2.20. Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПС-С-1-3

Як видно з рис. 2.20, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується виразом

$$\tau = 4,403 \cdot 10^5 v_{\text{КОВЗ}}^{0,276},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.6. Полістирол ПС-С-1-3 з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105

Виходячи з даних, отриманих дослідженням течії ПС-С-1-3 зі

змащувальним агентом на семи діаметрах капілярів за різних напружень зсуву побудовано залежність напруження зсуву від швидкості зсуву (рис. 2.21).

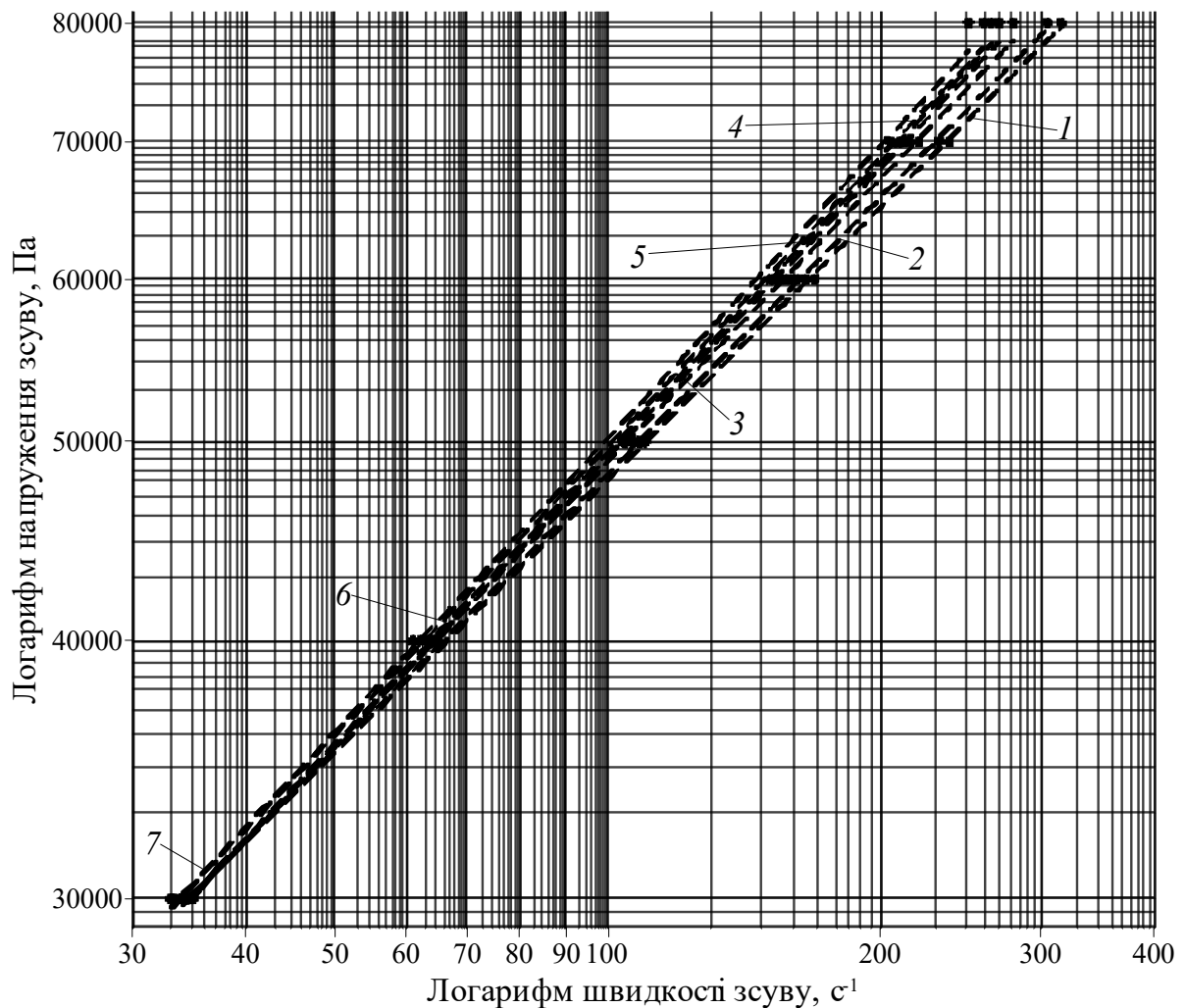


Рис. 2.21. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву за різного діаметра каналу, мм:
1 – 1; 2 – 1,18; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 2,095; 6 – 2,5; 7 – 3

З рис. 2.21 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не збігаються. Неінваріантний характер кривих залежності згідно з п. 2.2.1 свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів згідно з методикою, наведеною у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час досліду з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами за постійного напруження зсуву (табл. 2.10).

Таблиця 2.10

$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
-----------------------	-----------------------	----------	-------------	----------------------------------

2,095	8	1,2	10781	10,55
2,095	16	2,4	10781	10,61

Як видно з табл. 2.10, швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику, описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, наведеного на рис. 2.21, визначається індекс течії ПС-С-1-3 зі змащувальним агентом

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,457.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, за різних напружень зсуву (рис. 2.22).

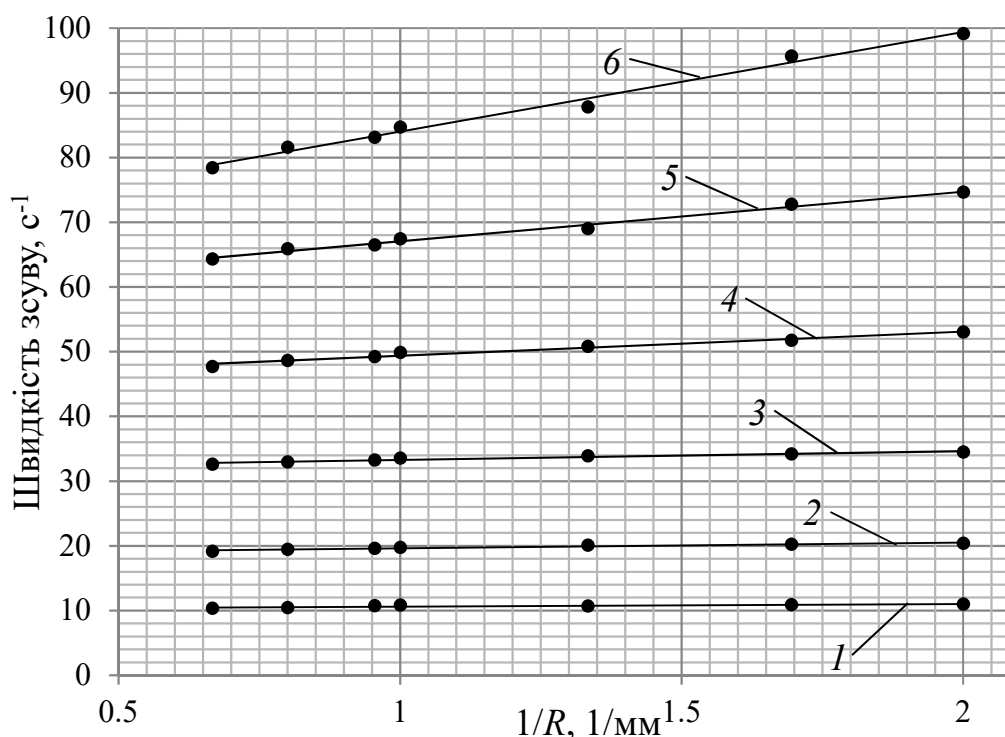


Рис. 2.22. Залежність швидкості зсуву ПС-С-1-3 зі змащувальним агентом від $1/R$ за різних напружень зсуву, МПа: 1 – 0,03; 2 – 0,04; 3 – 0,05; 4 – 0,06; 5 – 0,07; 6 – 0,08

Виконавши лінійну апроксимацію точок, наведених на рис. 2.22, отримаємо такі вирази:

$$\dot{\gamma} = 0,4002 \frac{1}{R} + 10,208, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 0,8796 \frac{1}{R} + 18,744, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 1,3371 \frac{1}{R} + 31,947, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 3,7177 \frac{1}{R} + 45,653, \text{ при } \tau = 0,06 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 7,6644 \frac{1}{R} + 59,395, \text{ при } \tau = 0,07 \text{ МПа};$$

$$\dot{\gamma} = 15,38 \frac{1}{R} + 68,632, \text{ при } \tau = 0,08 \text{ МПа}.$$

З наведених виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкості на стінці каналу виходячи з (2.10), що наведена на рис. 2.23.

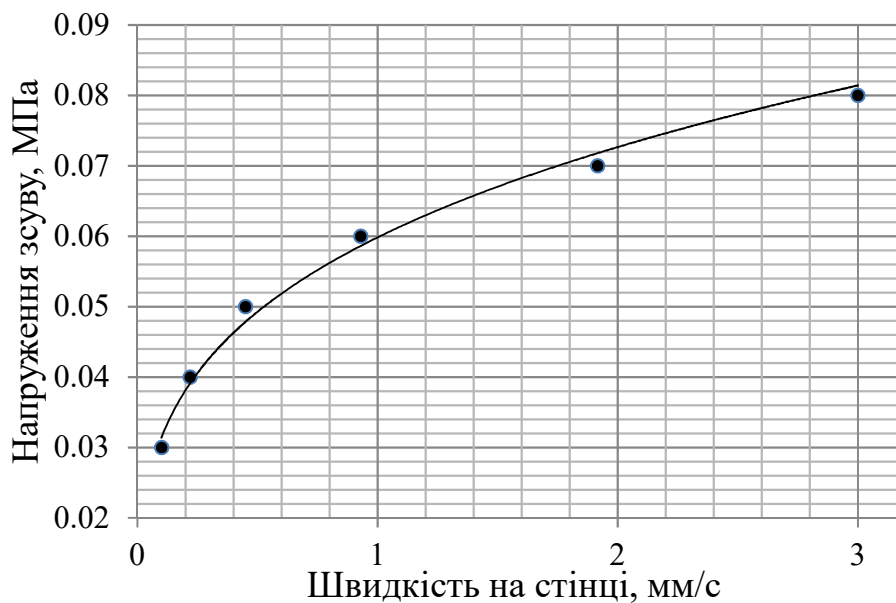


Рис. 2.23. Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПС-С-1-3 зі змащувальним агентом

Як видно з рис. 2.23, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має степеневий характер та описується виразом

$$\tau = 4,145 \cdot 10^5 v_{\text{ковз}}^{0,28},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

2.4.7. Полістирол ПС-С-1-3 вторинний

Виходячи з даних, отриманих дослідженням течії вторинного ПС-С-1-3 на семи діаметрах капілярів за різних напружень зсуву побудовано залежність напруження зсуву від швидкості зсуву (рис. 2.24).

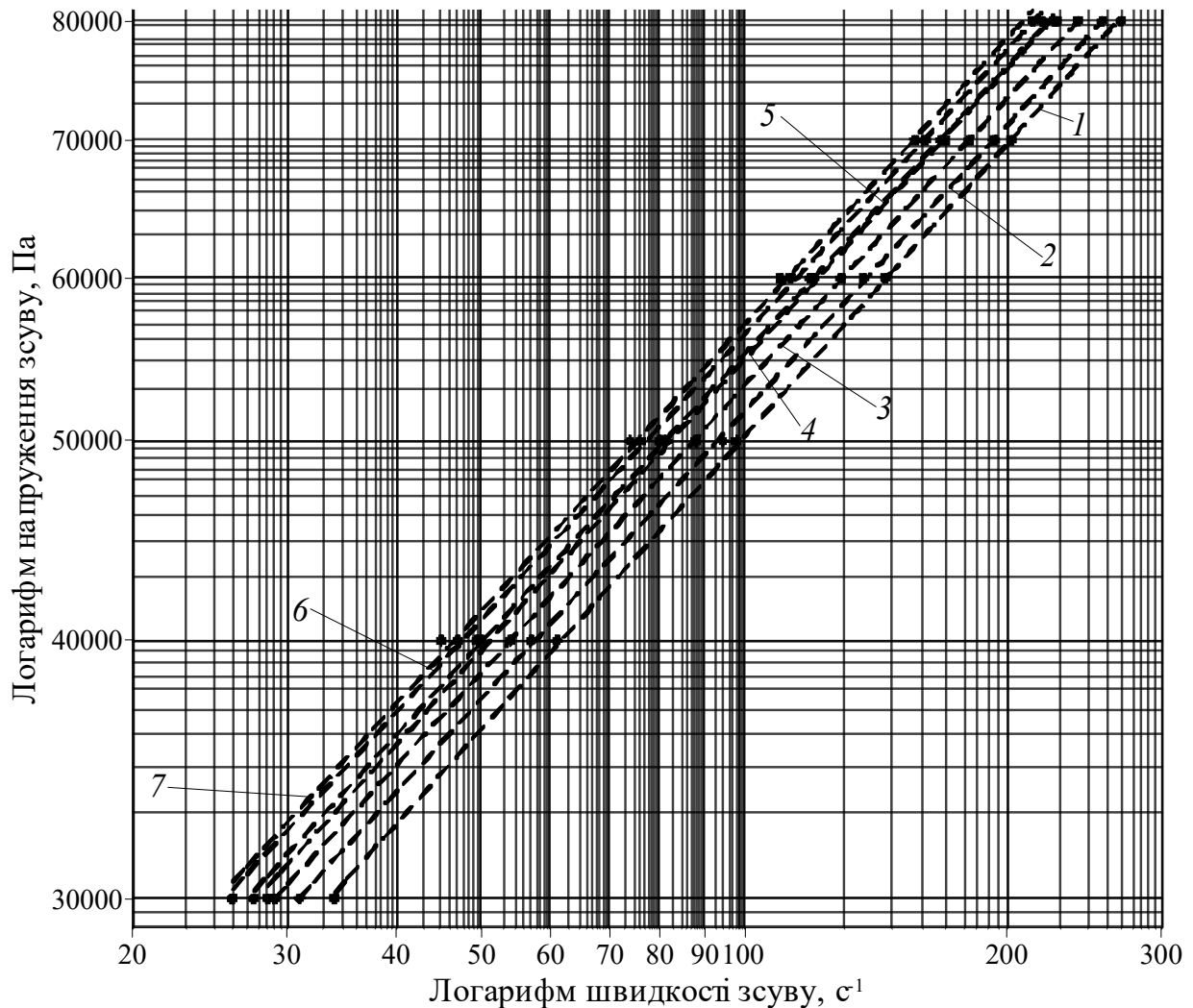


Рис. 2.24. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву за різного діаметра каналу, мм:
1 – 1; 2 – 1,18; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 2,095; 6 – 2,5; 7 – 3

З рис. 2.24 видно, що криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву не збігаються. Неінваріантний характер кривих залежності згідно з п. 2.2.1 свідчить про наявність пристінних ефектів у матеріалі.

Для визначення характеру пристінних ефектів згідно з методикою, наведеною у п. 2.2.1, досліджувалися на рівність швидкості зсуву, отримані під час досліду з однаковими діаметрами капіляра та різними його довжинами за постійного напруження зсуву (табл. 2.11).

Таблиця 2.11

$D_{\text{кап}}$, мм	$L_{\text{кап}}$, мм	m , кг	τ , Па	$\dot{\gamma}$, с^{-1}
2,095	8	1,2	10781	6,32
2,095	16	2,4	10781	6,35

Як видно з табл. 2.11, швидкості зсуву відрізняються не більш ніж на величину граничного відхилення значень швидкості зсуву – 3,1 % (2.20), що свідчить про утворення низькомолекулярного шару на границі зі стінкою, тому застосовуємо методику, описану у п. 2.2.3.

За даними графіка, наведеного на рис. 2.24, визначається індекс течії вторинного ПС-С-1-3

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)} = 0,467.$$

Виходячи з експериментальних даних побудовано графік залежності середньоінтегральної швидкості зсуву потоку (2.8) від оберненого радіуса використаних у дослідженні капілярів, $1/R$, за різних напружень зсуву (рис. 2.25).

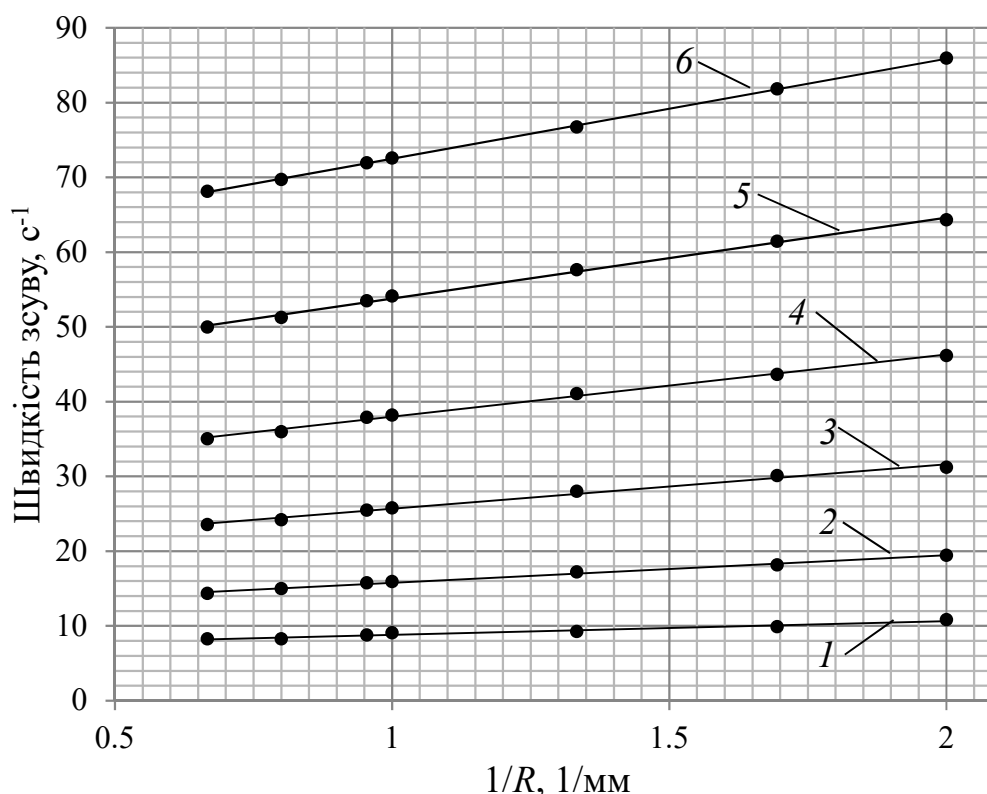


Рис. 2.25. Залежність швидкості зсуву вторинного ПС-С-1-3 від $1/R$ за різних напружень зсуву, МПа: 1 – 0,03; 2 – 0,04; 3 – 0,05; 4 – 0,06; 5 – 0,07; 6 – 0,08

Виконавши лінійну апроксимацію точок, наведених на рис. 2.25, отримаємо такі вирази:

$$\dot{\gamma} = 1,8183 \frac{1}{R} + 6,9915, \text{ при } \tau = 0,03 \text{ МПа ;}$$

$$\dot{\gamma} = 3,6721 \frac{1}{R} + 12,098, \text{ при } \tau = 0,04 \text{ МПа ;}$$

$$\dot{\gamma} = 5,9443 \frac{1}{R} + 19,724, \text{ при } \tau = 0,05 \text{ МПа ;}$$

$$\dot{\gamma} = 8,3068 \frac{1}{R} + 29,674, \text{ при } \tau = 0,06 \text{ МПа ;}$$

$$\dot{\gamma} = 10,819 \frac{1}{R} + 42,968, \text{ при } \tau = 0,07 \text{ МПа ;}$$

$$\dot{\gamma} = 13,381 \frac{1}{R} + 59,111, \text{ при } \tau = 0,08 \text{ МПа .}$$

З наведених вище виразів отримуємо коефіцієнти залежності (2.9), що дозволяють побудувати залежність напруження зсуву від швидкості на стінці каналу виходячи з (2.10), наведена на рис. 2.26.

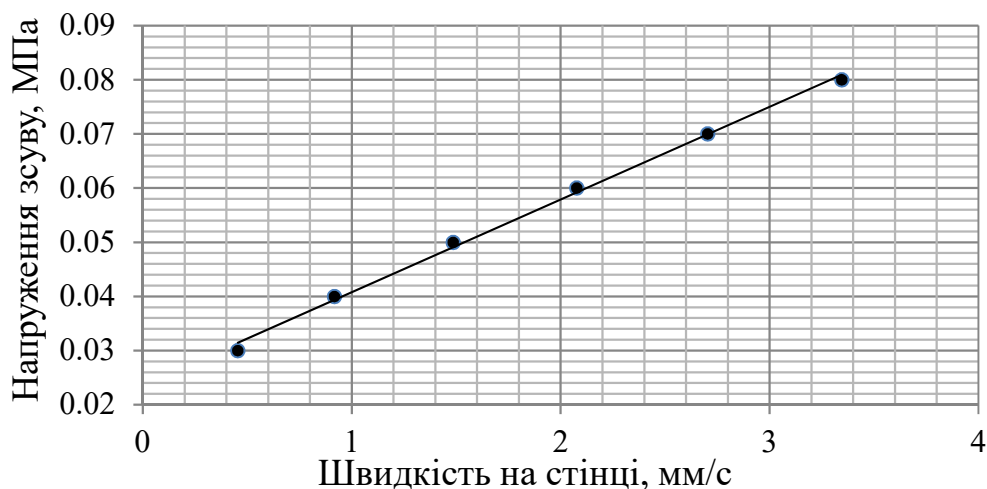


Рис. 2.26. Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для вторинного ПС-С-1-3

Як видно з рис. 2.26, залежність напруження зсуву від швидкості на стінці має лінійний характер та описується виразом

$$\tau = 1,711 \cdot 10^7 + 2,368 \cdot 10^4 v_{\text{КОВЗ}},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$.

Висновки. Проведене дослідження дозволяє встановити характер і величину пристінних ефектів для будь-яких полімерних матеріалів, що можуть бути описані степеневим законом.

2.5. Властивості матеріалу

Для підтвердження доцільності використання степеневого закону для опису залежності в'язкості від швидкості зсуву під час течії розплаву полімерного матеріалу, виконується співставлення даних, отриманих експериментальним шляхом, та степеневій залежності в'язкості від швидкості зсуву.

2.5.1. Полістирол ПС-С-1-3

Для визначення залежності в'язкості від швидкості зсуву дані всіх експериментальних досліджень ПС-С-1-3 наносяться на графік, наведений на рис. 2.27.

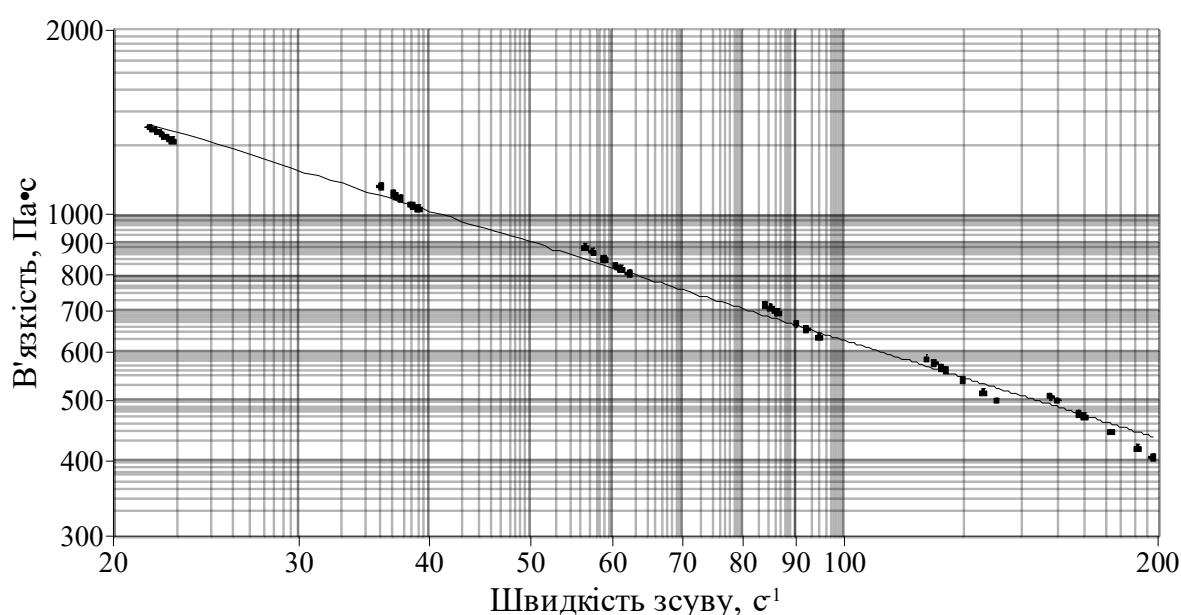


Рис. 2.27. Залежність в'язкості від швидкості зсуву для ПС-С-1-3

Апроксимуючи точки на графіку, наведеному на рис. 2.27, степеневою функцією отримаємо залежність в'язкості від швидкості зсуву, що описується виразом

$$\eta = 7153\dot{\gamma}^{-0,53}.$$

Цей вираз може бути використаний під час числового моделювання течії розплаву полімерного матеріалу.

2.5.2. Поліетилен високого тиску 15803-020

Для визначення залежності в'язкості від швидкості зсуву дані всіх експериментальних досліджень ПЕВТ 15803-020 наносяться на графік, наведений на рис. 2.28.

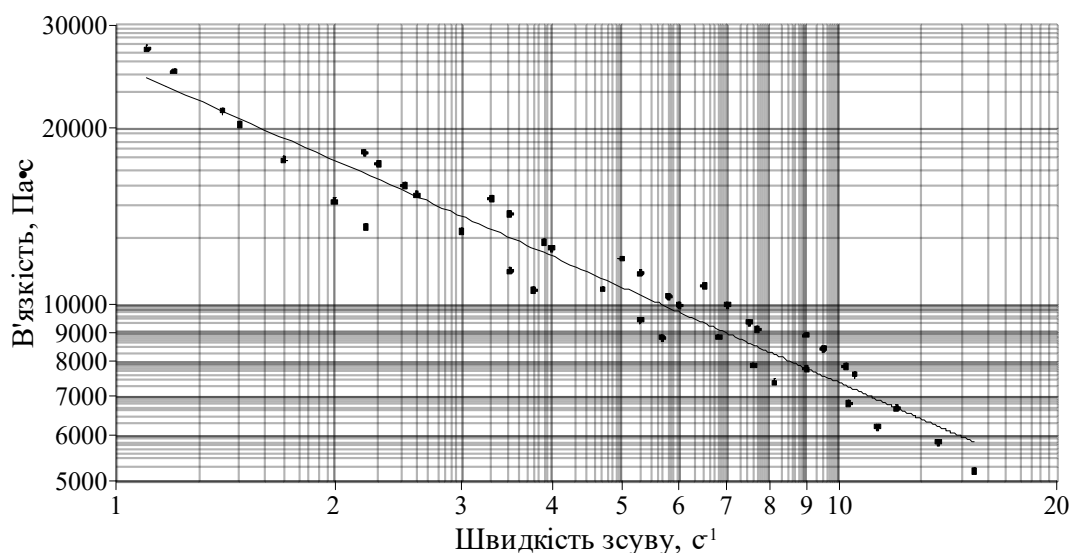


Рис. 2.28. Залежність в'язкості від швидкості зсуву для ПЕВТ 15803-020

Апроксимуючи точки на графіку, наведеному на рис. 2.28, степеневою функцією отримаємо залежність в'язкості від швидкості зсуву, що описується виразом

$$\eta = 25674 \dot{\gamma}^{-0,54}.$$

Цей вираз може бути використаний під час числового моделювання течії розплаву полімерного матеріалу.

2.5.3. Севілен 11104-030

Для визначення залежності в'язкості від швидкості зсуву дані всіх експериментальних досліджень севілену 11104-030 наносяться на графік, наведений на рис. 2.29.

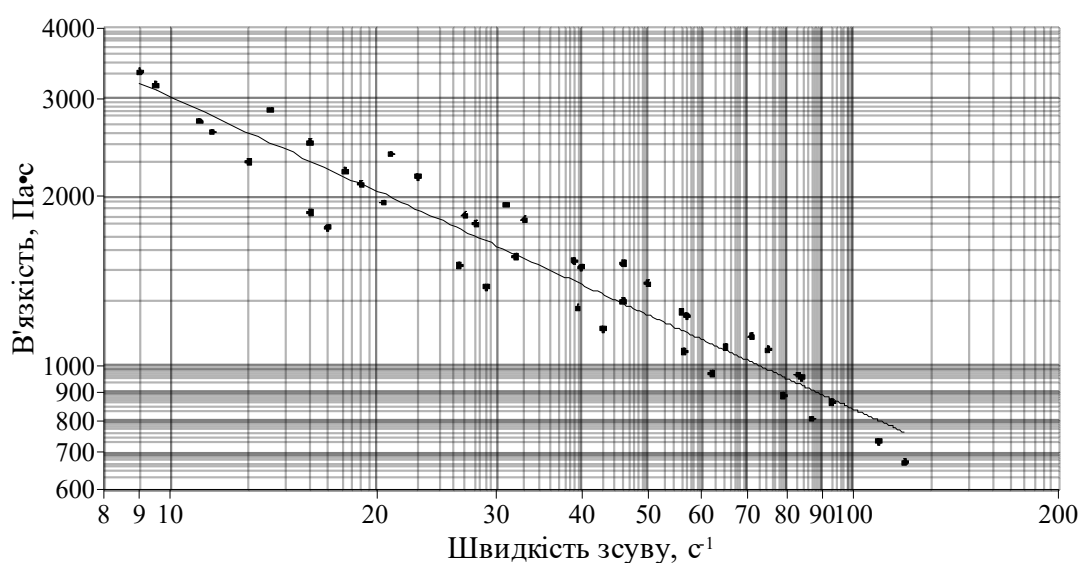


Рис. 2.29. Залежність в'язкості від швидкості зсуву для севілену 11104-030

Апроксимуючи точки на графіку, наведеному на рис. 2.29, степеневою функцією, отримуємо залежність в'язкості від швидкості зсуву, що описується виразом

$$\eta = 10821 \dot{\gamma}^{-0,56}.$$

Цей вираз може бути використаний під час числового моделювання течії розплаву полімерного матеріалу.

2.6. Нестабільності потоку розплаву полімеру

Під час експериментальних досліджень за деяких режимів спостерігалися пульсації потоку розплаву полімеру (рис. 2.30).

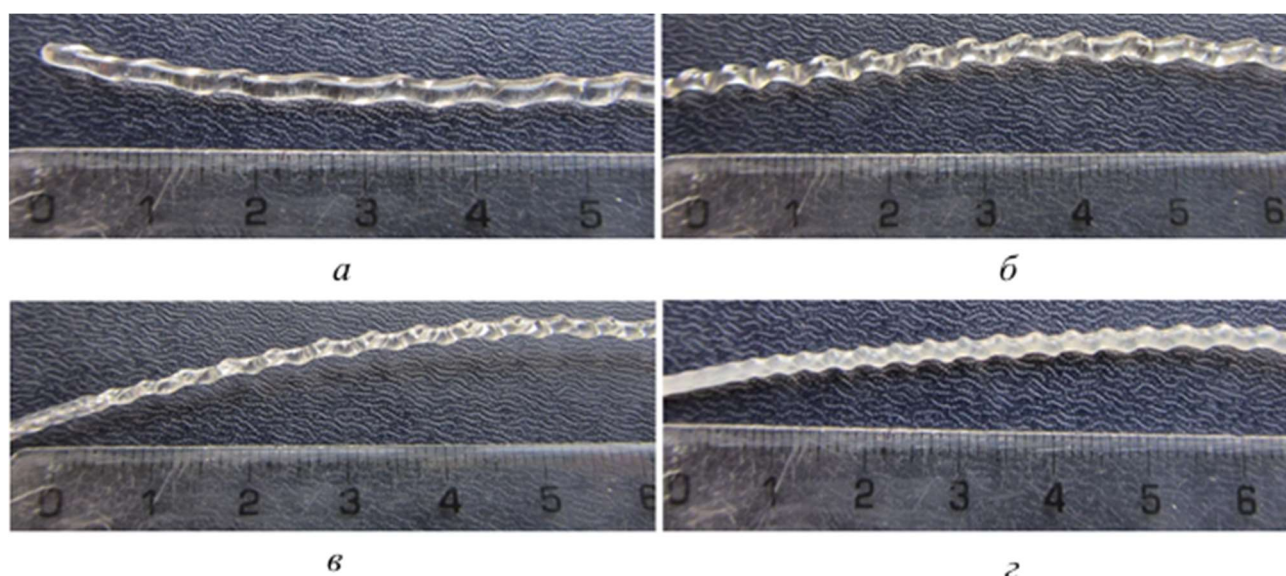


Рис. 2.30. Нестабільності потоку: а – ПС-С-1-3; б, в – ПЕВТ 15803-020; з – севілен 11104-030

Пульсації потоку спостерігалися за швидкостей зсуву, що перевищували:

- для ПЕВТ 15803-020 – 20 с^{-1} ;
- для севілену 11104-030 – 200 с^{-1} ;
- для ПС-С-1-3 – 300 с^{-1} .

Причиною нестабільності потоку є явище вискоеластичної турбуленції, що виникає внаслідок накопичення надлишкової вискоеластичної деформації.

У п. 4.1 і 4.2 запропоновано конструкції екструзійних головок, покликаних зменшити можливі пульсації потоку, спричинених вискоеластичною турбулентністю.

2.7. Висновки

Проведені експериментальні дослідження дозволили отримати дані про

природу, характер, величину прістнних ефектів та параметри для завдання граничних умов під час числового моделювання для досліджуваних полімерних матеріалів [102–106].

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ

3.1. Математична модель

При моделюванні процесу ізотермічної течії з урахуванням пристінних ефектів за основу взята узагальнена модель ньютонівського потоку [66, 107], що базується на розв'язку рівнянь імпульсу і нестисливості.

Рівняння нестисливості

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0.$$

Рівняння імпульсу

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i,$$

оскільки $t = \text{const}$ то рівняння матиме вигляд

$$\frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i.$$

Девіатор тензору деформації визначається

$$\tau_{ij} = \eta(\dot{\gamma}) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right).$$

Залежність в'язкості від швидкості зсуву виражена степеневим законом

$$\eta(\dot{\gamma}) = K (\lambda \dot{\gamma})^{n-1}.$$

Пристінні ефекти на стінці описуються за допомогою узагальненого закону Нав'є [62]

$$\tau = -F_{slip} |v_s - v_w|^{e_{slip}}, \quad (3.1)$$

де v_s – тангенціальна швидкість течії; v_w – тангенціальна швидкість стінки; F_{slip} та e_{slip} – параметри матеріалу, знайдені з експерименту.

Враховуючи, що пристінні ефекти можуть проявляти себе за рахунок ковзання по стінці або утворення низькомолекулярного шару, встановлення параметрів матеріалу для узагальненого закону Нав'є відрізняється залежно від природи пристінних ефектів.

3.2. Встановлення параметрів математичної моделі

3.2.1. Геометричні параметри та скінченноелементна сітка

Моделювання проводилося на таких типах каналів:

- циліндричному з метою підтвердження адекватності експериментальних даних;
- конічному з метою визначення впливу геометрії на величину пристінних ефектів;
- прямокутному з метою визначення впливу геометрії на величину пристінних ефектів;
- геометрії формуючої головки з метою оцінки величини впливу пристінних ефектів.

Циліндричний канал для перевірки адекватності експериментальних даних реалізовано у вигляді двовимірної осесиметричної моделі (рис. 3.1), що має радіус 1,0475 мм та довжину 16 мм. Канал розбитий на 4020 скінченних елементів.

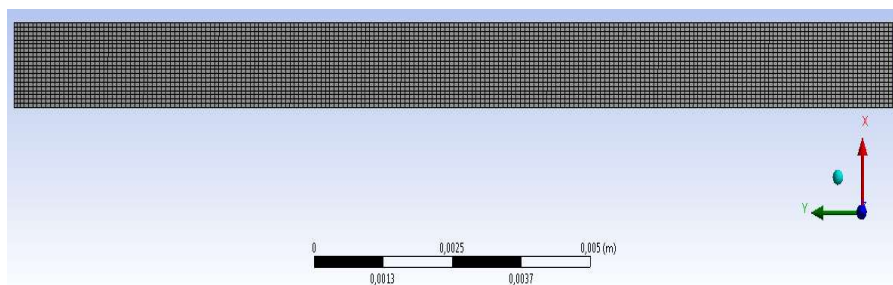


Рис. 3.1. Скінченноелементна модель циліндричного каналу

Конічний канал для визначення впливу геометрії на величину пристінних ефектів реалізовано у вигляді двовимірної вісесиметричної моделі, що має параметрично задані радіус входу, радіус виходу та довжину. Схему каналу наведено на рис. 3.2. Канал розбитий на 4020 скінченних елементів.

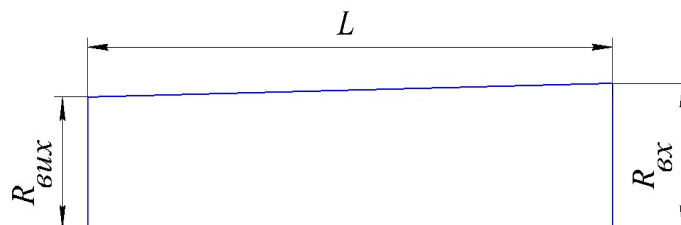


Рис. 3.2. Схема конічного каналу

Канал з прямокутною геометрією для визначення впливу геометрії на величину пристінних ефектів реалізовано у вигляді тривимірної моделі (рис. 3.3), що має параметрично задані ширину, висоту та довжину. Канал розбитий на 14520 скінченних елементів.

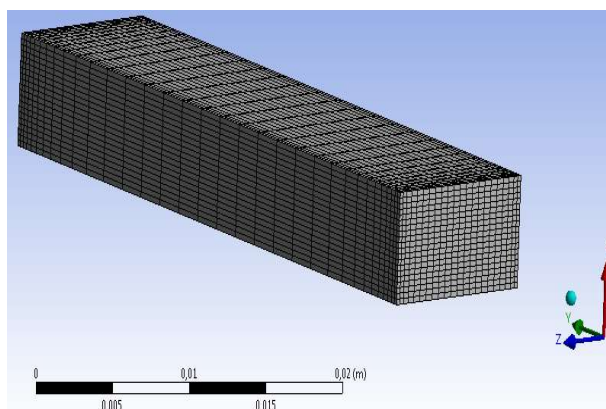


Рис. 3.3. Скінченноелементна модель прямокутного каналу

Канал з геометрією формуючої головки для визначення величини впливу пристінних ефектів на параметри процесу реалізовано у вигляді тривимірної моделі симетричної четврті формуючої головки (рис. 3.4). Канал розбитий на 339766 скінченних елементів.

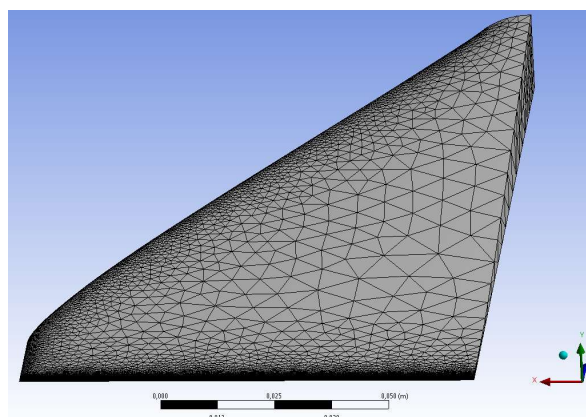


Рис. 3.4. Скінченноелементна модель каналу з геометрією формуючої головки

3.2.2. Граничні умови математичної моделі

При математичному моделюванні течії полімерних матеріалів використовувалися такі граничні умови:

- вхід у канал – об'ємна витрата;
- вихід з каналу – відсутність тиску;
- стінки каналу – ковзання на стінці за допомогою узагальненого закону Нав'є (3.1).

3.2.3. Дослідження збіжності сітки

З метою визначення мінімально необхідної розрахункової сітки для отримання якісного результату розрахунку проведено дослідження збіжності сітки. Для задач течії по каналах найбільш характерним параметром є перепад тиску, який використано як контрольний параметр.

Дослідження збіжності сітки для циліндричного каналу проводилося співставленням перепадів тиску за різних значень кількості елементів по радіусу поперечного перетину. Результати дослідження наведено на рис. 3.5.



Рис. 3.5. Залежність перепаду тиску від кількості елементів по радіусу каналу

Як видно з рис. 3.5, збільшення густини сітки більше 30 елементів впливає на перепад тиску несуттєво.

Густина сітки для конічного каналу була використана така ж сама, як і для циліндричного, оскільки конічний канал є частинним випадком циліндричного.

Дослідження збіжності сітки для прямокутного каналу проводилося співставленням перепадів тиску за різних значень кількості елементів по ширині та висоті поперечного перерізу. Результати дослідження наведено на рис. 3.6.

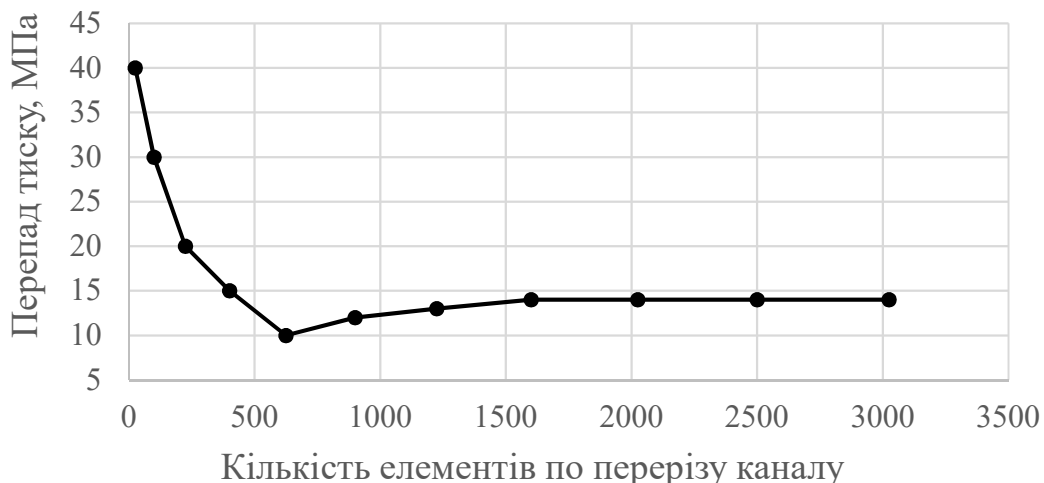


Рис. 3.6. Залежність перепаду тиску від кількості елементів по перетину каналу

Як видно з рис. 3.6, збільшення густини сітки більше 1600 елементів впливає на перепад тиску несуттєво.

Дослідження збіжності сітки для геометрії формуючої головки проводилося співставленням перепадів тиску за різних значень граничних розмірів елемента. Результати дослідження наведено на рис. 3.7.

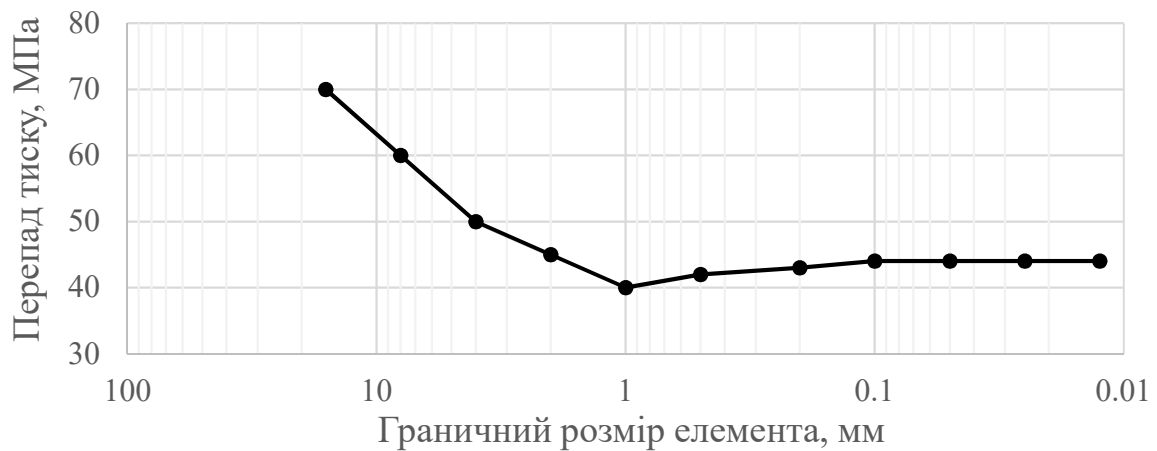


Рис. 3.7. Залежність перепаду тиску від граничного розміру елемента

Як видно з рис. 3.7, зменшення розміру елемента менше 0,1 мм впливає на перепад тиску несуттєво.

3.2.4. Підтвердження адекватності моделі

Для підтвердження адекватності обраної математичної моделі та граничних умов було проведено моделювання на каналі, геометрія якого збігається з геометрією одного з капілярів, що використовувалися при натурному експерименті. Результати моделювання наведені на рис. 3.8, з метою оцінки розбіжності для експериментальної кривої на графік нанесені планки похибок 5 %. Додатково було проведено співставлення з існуючими результатами досліджень [108, 109]. Результати співставлення наведені на рис. 3.9.

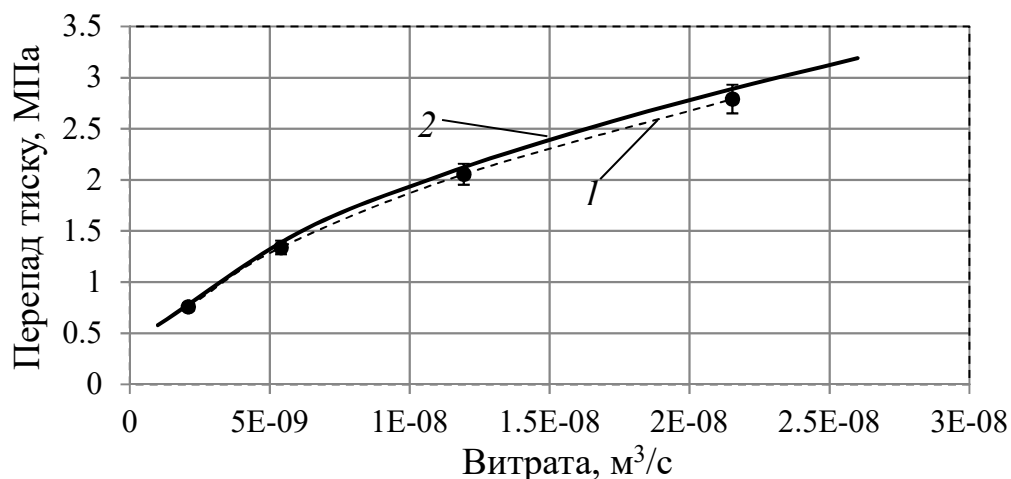


Рис. 3.8. Порівняння залежностей перепаду тиску від об'ємної витрати, отриманих експериментально та моделюванням з урахуванням пристінних ефектів для ПЕВТ 15803-020: 1 – експериментальні дані; 2 – результати моделювання

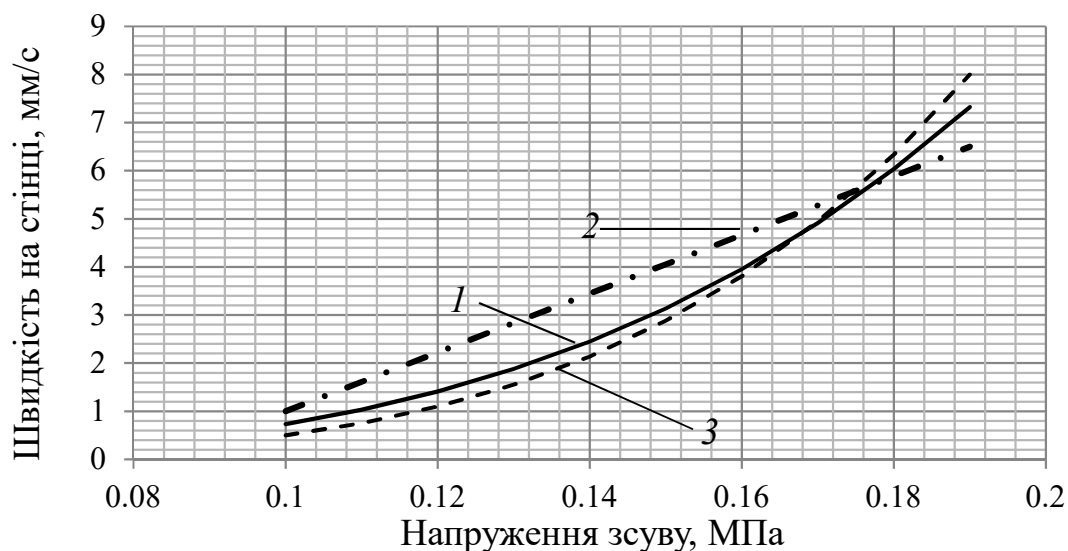


Рис. 3.9. Порівняння залежностей швидкості на стінці від напруження зсуву з існуючими результатами для ПЕВТ 15803-020: 1 – результати моделювання; 2 – результати [108]; 3 – результати [109]

Як видно з рис. 3.8, дані, отримані при моделюванні, відрізняються від експериментальних не більше ніж на 5 %, а порівняно з існуючими результатами не більше ніж на 20 %, що пояснюється різним підходом до визначення параметрів матеріалу, граничних умов та відмінностей у математичних моделях. Прийнятна збіжність з експериментальними даними та існуючими результатами свідчить про адекватність розробленої моделі.

3.2.5. Підтвердження адекватності ізотермічного припущення

Адекватність ізотермічного припущення перевірялась числовим розрахунком для ізотермічного режиму і з урахуванням дисипації за постійної температури стінок. Результати моделювання наведено на рис. 3.10.

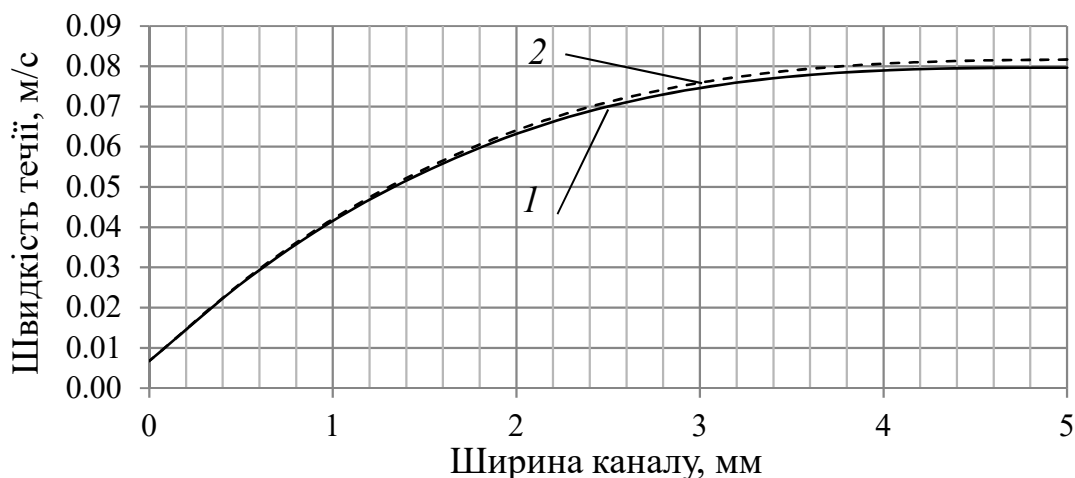


Рис. 3.10. Порівняння швидкостей по ширині каналу, отриманих моделюванням для ізотермічного та неізотермічного режимів: 1 – ізотермічна течія; 2 – неізотермічна течія

Як видно з рис. 3.10, дані, отримані при моделюванні, відрізняються від експериментальних не більше ніж на 4 %, що підтверджує можливість розрахунків в ізотермічному наближенні.

3.2.6. Підтвердження адекватності екстраполяції результатів досліджень на некруглі канали

З метою підтвердження адекватності екстраполяції результатів, отриманих у експериментальних дослідженнях з циліндричними каналами, на інші типи каналів було проведено додатковий дослід з капіляром прямокутної форми, гідравлічний діаметр якого дорівнював діаметра одного із досліджуваних капілярів.

Залежності напруження зсуву від швидкості зсуву для циліндричного та прямокутного каналу наведені на рис. 3.11.

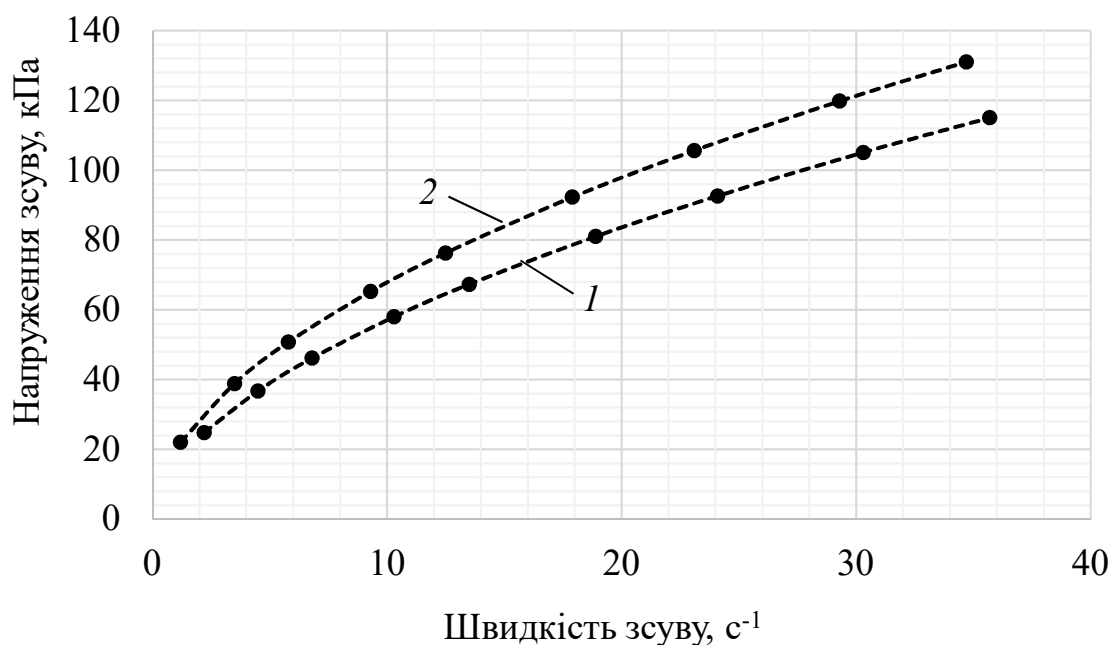


Рис. 3.11. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву для циліндричного та прямокутного каналів для ПЕВТ 15803-020: 1 – циліндричний канал; 2 – прямокутний канал

Як видно з рис. 3.11, під час течії полімерного матеріалу крізь прямокутний канал в порівнянні з циліндричним має місце збільшення величини напружень зсуву на 15 %. Проте, це збільшення має величину, близьку до постійної у всьому діапазоні досліджуваних швидкостей зсуву.

Оскільки в результатах математичного моделювання враховується не абсолютні значення параметрів, а їх незмінні відносні величини, то екстраполяція результатів, отриманих у експериментальних дослідженнях з циліндричними каналами на інші типи каналів є прийнятною.

3.3. Результати математичного моделювання

3.3.1. Результати моделювання каналу циліндричної геометрії

Для оцінки впливу пристінних ефектів на параметри процесу течії для кожного з досліджуваних матеріалів було проведено три типи моделювання: без урахування пристінних ефектів (швидкість на стінці відсутня), з урахуванням ковзання на стінці та з урахуванням використання змащувального агенту. Результати моделювання течії ПЕВТ 15803-020 для діаметра каналу 0,5 мм наведено на рис. 3.12.

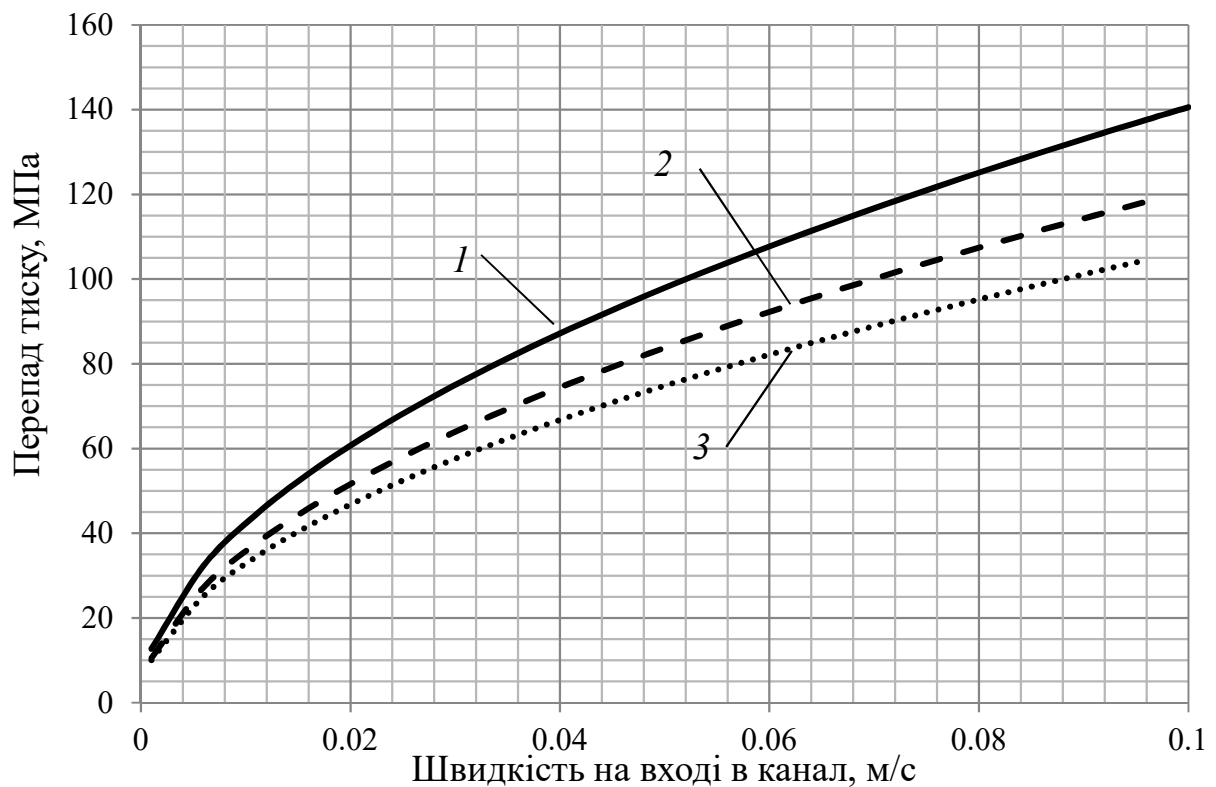


Рис. 3.12. Залежність перепаду тиску від швидкості на вході в канал за різних варіантів граничних умов на стінці й діаметрі каналу 0,5 мм: 1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змащенням

Як видно з рис. 3.12, відсутність врахування пристінних ефектів для ПЕВТ 15803-020 призводить до похибки в значенні перепаду тиску відносно врахування пристінних ефектів, величиною в 14 %, що може вносити істотні розбіжності при моделюванні переробного обладнання. Додавання змащувального матеріалу при цьому зменшує значення перепаду тиску ще на 11,5 %.

Для перевірки впливу діаметра каналу на величину похибки без врахування та з урахуванням пристінних ефектів було проведено моделювання

для діаметра каналу 10 мм, результати якого наведено на рис. 3.13.

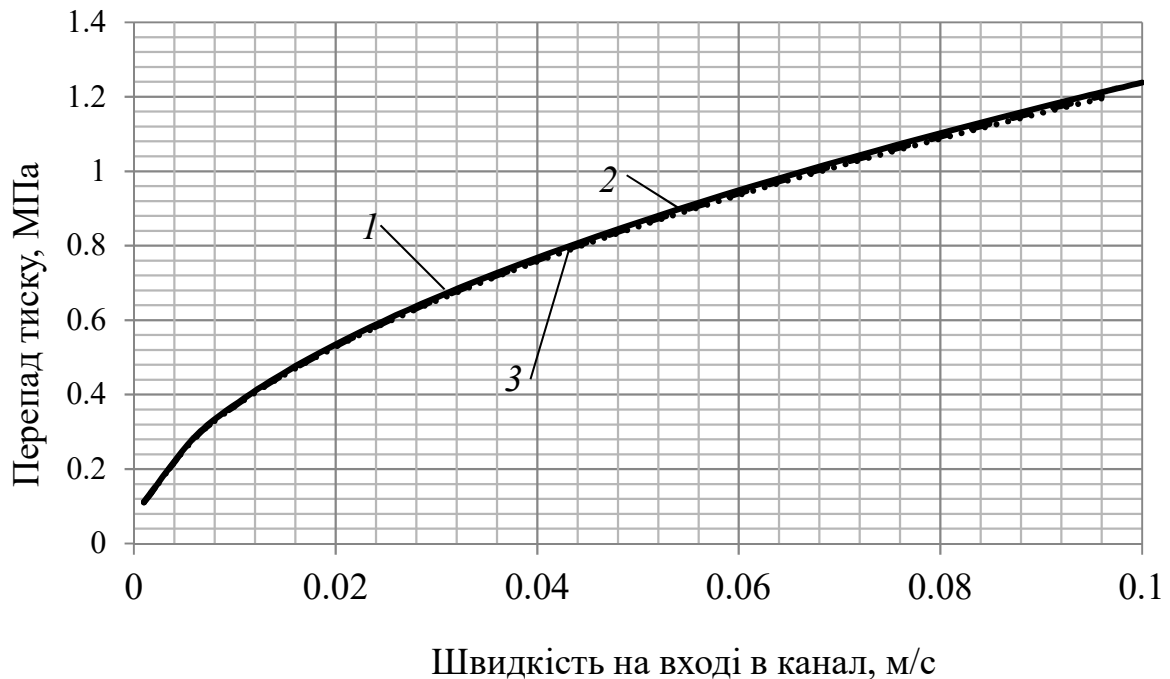


Рис. 3.13. Залежність перепаду тиску від швидкості на вході в канал за різних варіантів граничних умов на стінці й діаметрі каналу 10 мм: 1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змащенням

Як видно з рис. 3.13, значення перепаду тиску для варіантів течії без урахування пристінних ефектів, з їх урахуванням та з додатковим змащуванням відрізняються не більше, ніж на 1 %, що свідчить про зменшення впливу пристінних ефектів при збільшенні діаметра каналу.

Для визначення величини впливу діаметра каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів та з їх урахуванням було проведено низку аналогічних досліджень за різних діаметрів каналу в діапазоні від 0,5 до 10 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від діаметра каналу (рис. 3.14). При цьому розбіжність перепаду тиску визначаються

$$\Delta P_1 = \frac{|\Delta P_0 - \Delta P_{\text{пр}}|}{\Delta P_0} \cdot 100 \%,$$

де $\Delta P_0 = P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}$ – перепад тиску на вході та виході з каналу без врахування пристінних ефектів, Па; $\Delta P_{\text{пр}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}$ – перепад тиску на вході та виході з каналу із врахуванням пристінних ефектів, Па.

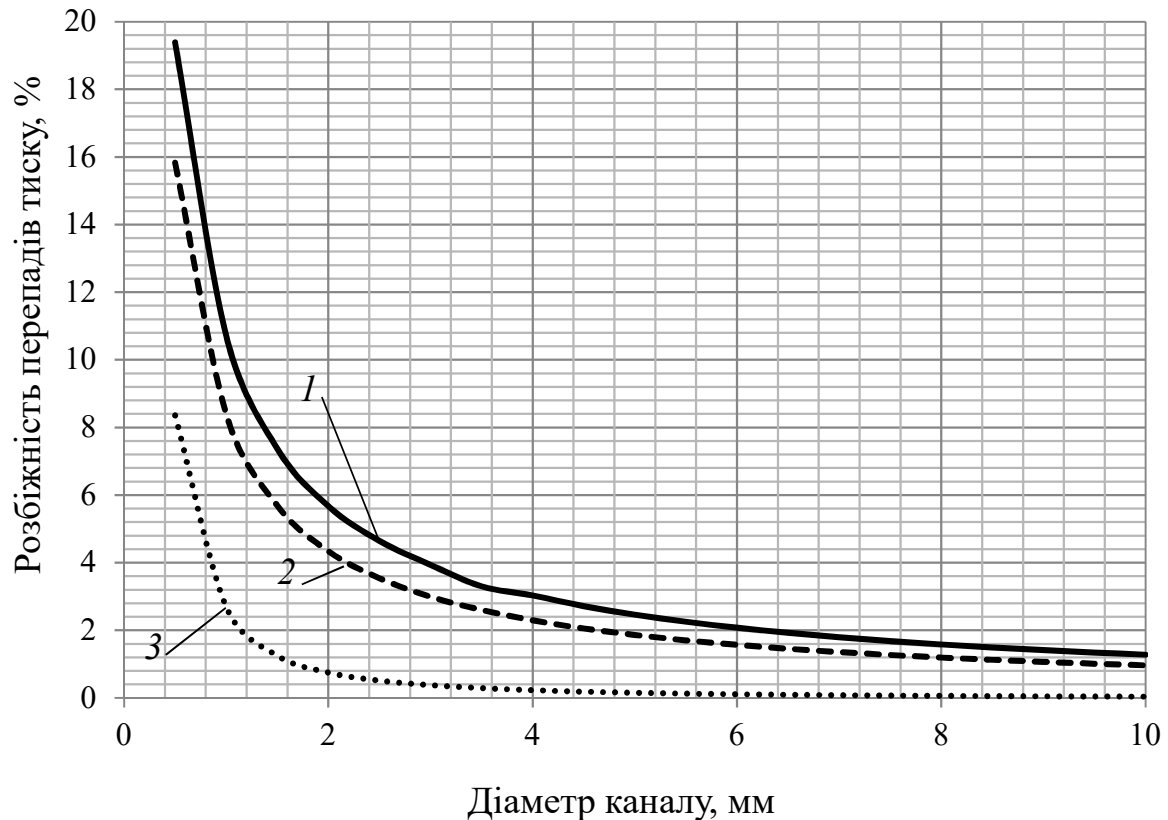


Рис. 3.14. Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від діаметра каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.14, залежності розбіжностей перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від діаметра каналу мають вигляд степеневого закону.

Для визначення величини впливу діаметра каналу на розбіжність у перепадах тисків під час течії без змащування та зі змащуванням було проведено низку досліджень за різних діаметрів каналу в діапазоні від 0,5 до 10 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від діаметра каналу (рис. 3.15). При цьому розбіжність перепаду тиску визначаються

$$\Delta P_2 = \frac{|\Delta P_{\text{пр}} - \Delta P_{\text{змащ}}|}{\Delta P_{\text{пр}}} \cdot 100 \%,$$

де $\Delta P_{\text{змащ}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}$ – перепад тиску на вході та виході з каналу із врахуванням додавання змащувального агенту, Па.

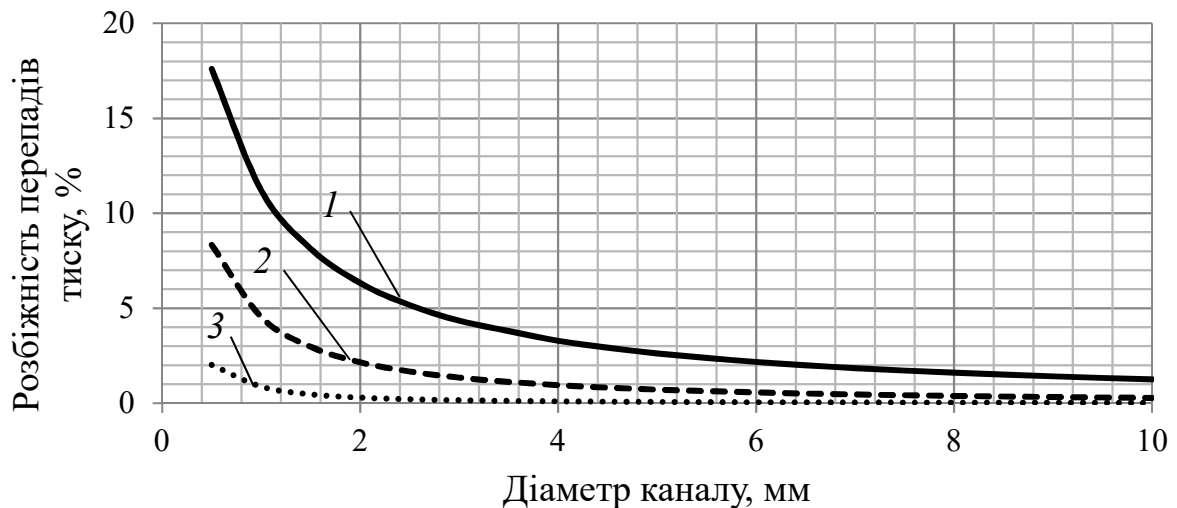


Рис. 3.15. Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від діаметра каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.15, залежності розбіжностей перепадів тиску між течією без та зі змащувальним агентом від діаметра каналу мають вигляд степеневого закону.

Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів несуттєвий на діаметрах каналу, більших за 4 мм, та збільшується на каналах менших діаметрів, досягаючи 20 %.

Для визначення величини впливу довжини каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів та з їх урахуванням було проведено низку досліджень за різних довжин каналу в діапазоні від 1 до 100 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу (рис. 3.16).

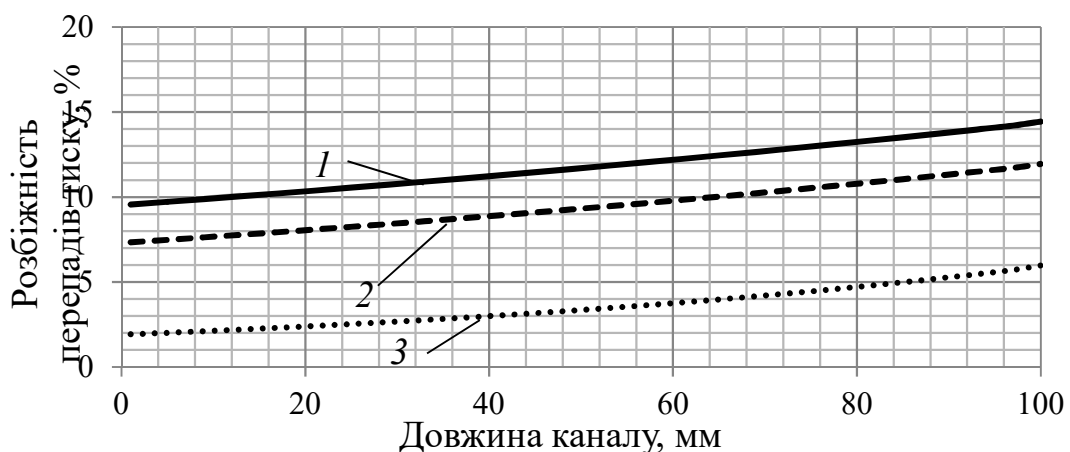


Рис. 3.16. Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.16, залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу має вигляд експоненційного закону.

Для визначення величини впливу довжини каналу на розбіжність у перепадах тисків під час течії без змащування та зі змащуванням було проведено низку досліджень за різних довжин каналу в діапазоні від 1 до 100 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу (рис. 3.17).

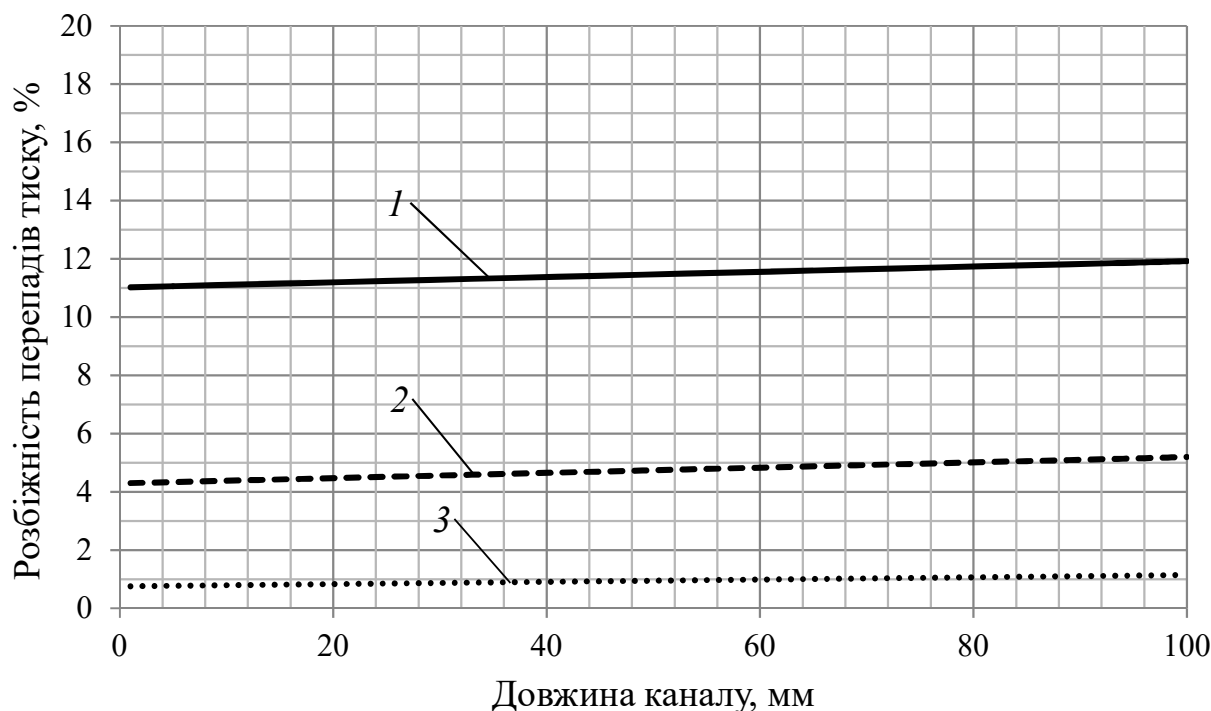


Рис. 3.17. Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.17, залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу має вигляд лінійного закону.

Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів не суттєвий на всьому діапазоні довжин каналів.

Для визначення величини впливу відношення діаметра входу до діаметра виходу ($D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$) каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів та з їх урахуванням було проведено низку досліджень за різних відношень $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу в діапазоні від 0,1 до 0,9 та від 2 до 10, що дозволило побудувати криві залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузора (рис. 3.18) і конфузора (рис. 3.19).

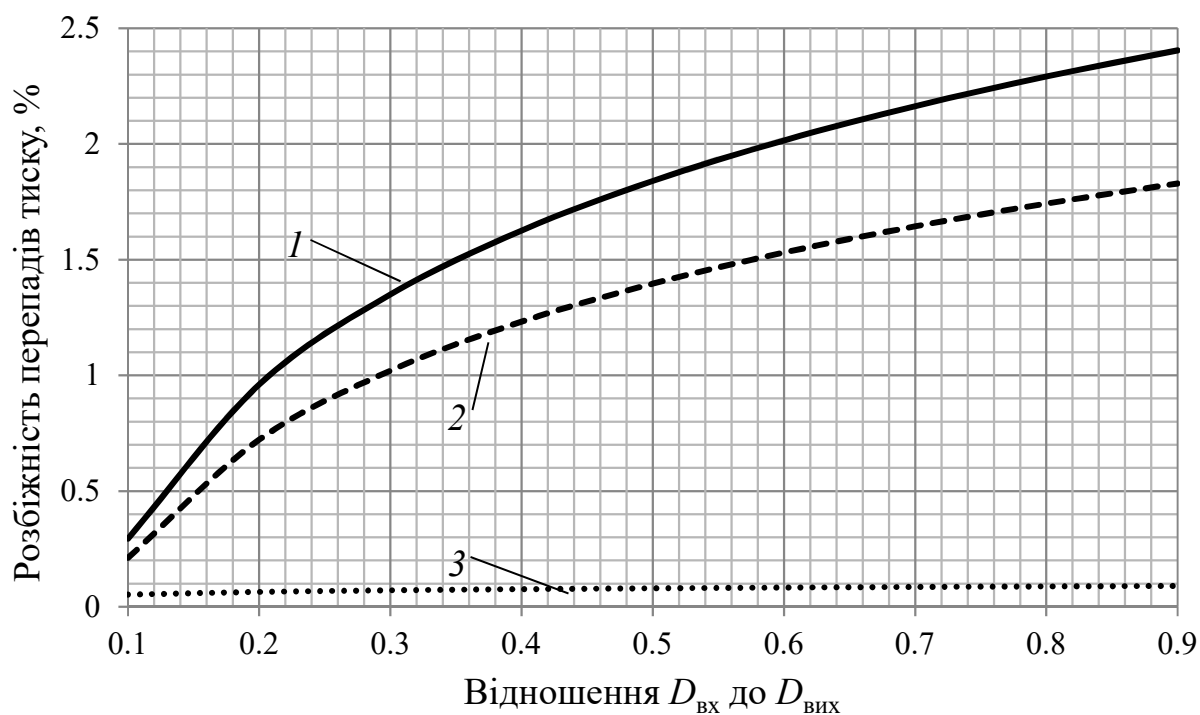


Рис. 3.18. Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення D_{vx}/D_{vih} каналу для дифузора:
 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

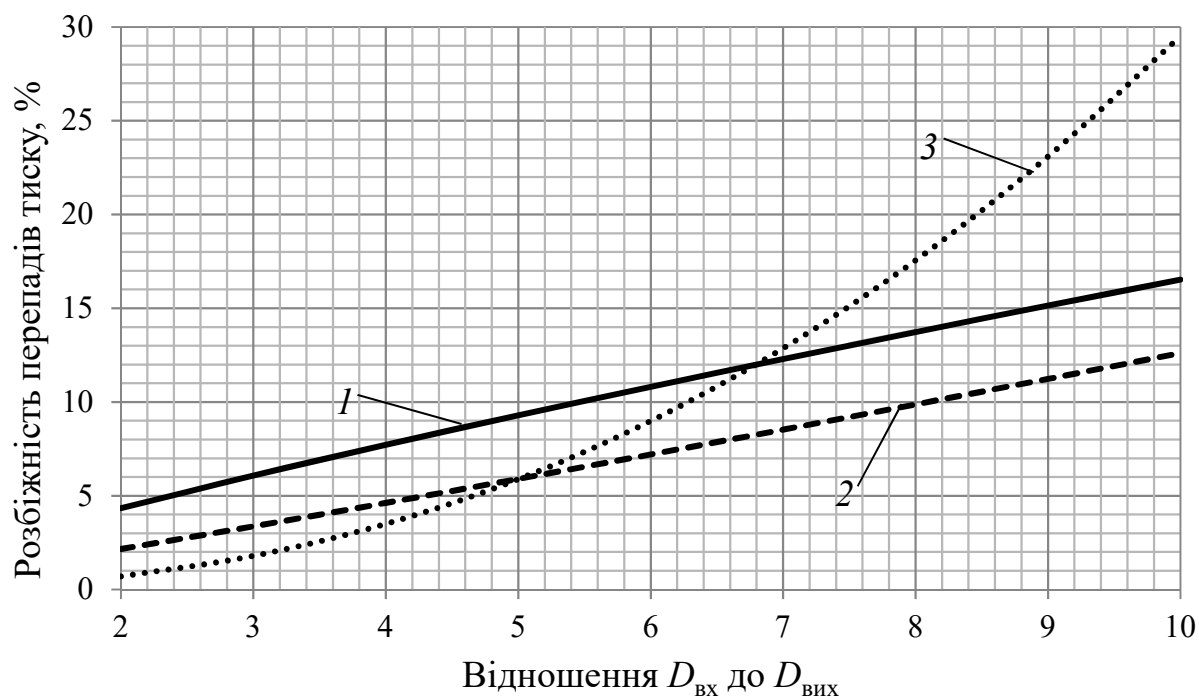


Рис. 3.19. Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення D_{vx}/D_{vih} каналу для конфузора:
 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.18, залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузору має вигляд логарифмічного закону, а для конфузора, виходячи з рис. 3.19 – степеневого закону.

Для визначення величини впливу відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу на розбіжність у перепадах тисків під час течії без змащування та зі змащуванням було проведено низку досліджень за різних відношень $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу в діапазоні від 0,1 до 0,9 та від 2 до 10, що дозволило побудувати криві залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузора (рис. 3.20) і конфузора (рис. 3.21).

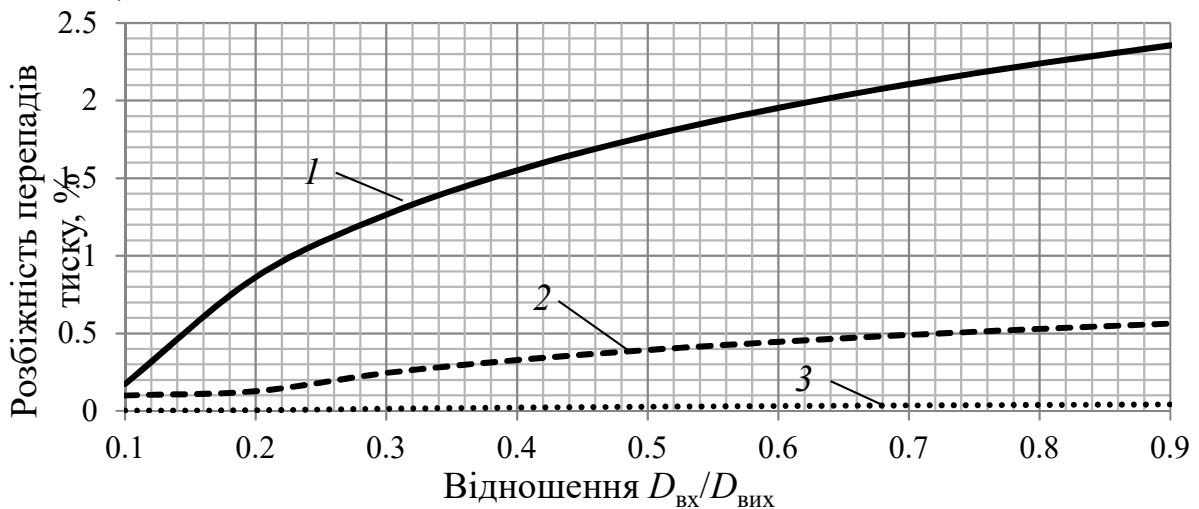


Рис. 3.20. Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузора:
1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

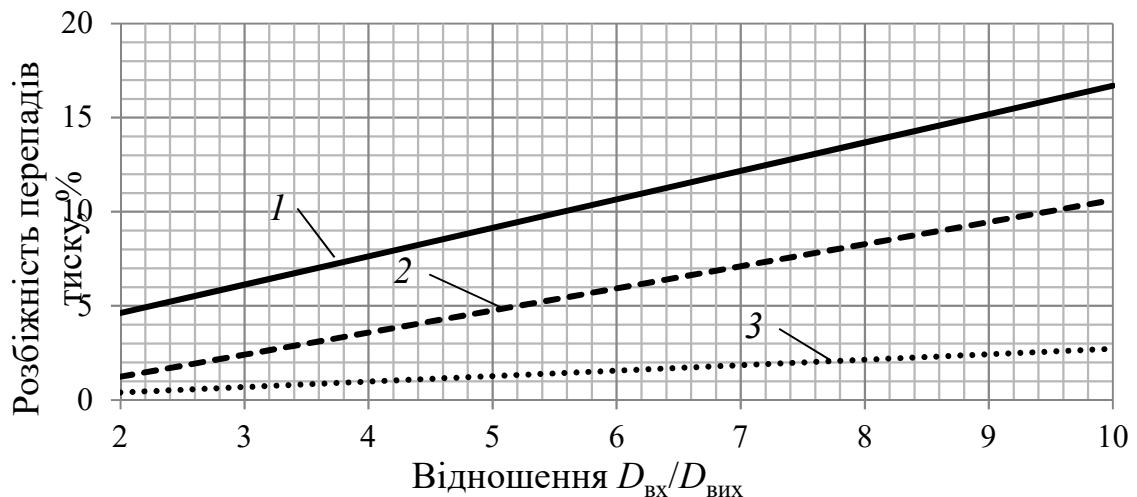


Рис. 3.21. Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для конфузора:
1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.20, залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ каналу для дифузора має вигляд логарифмічного закону, а для конфузора, виходячи з рис. 3.21 – лінійного закону.

Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів суттєвий для конфузорного виконання каналу та несуттєвий для дифузорного виконання.

3.3.2. Результати моделювання для каналу прямокутної геометрії

Для визначення величини впливу розмірів каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів та з їх урахуванням було проведено низку досліджень за різних величин ширини та висоти каналу в діапазоні від 1 до 10 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від ширини та висоти каналу (рис. 3.22).

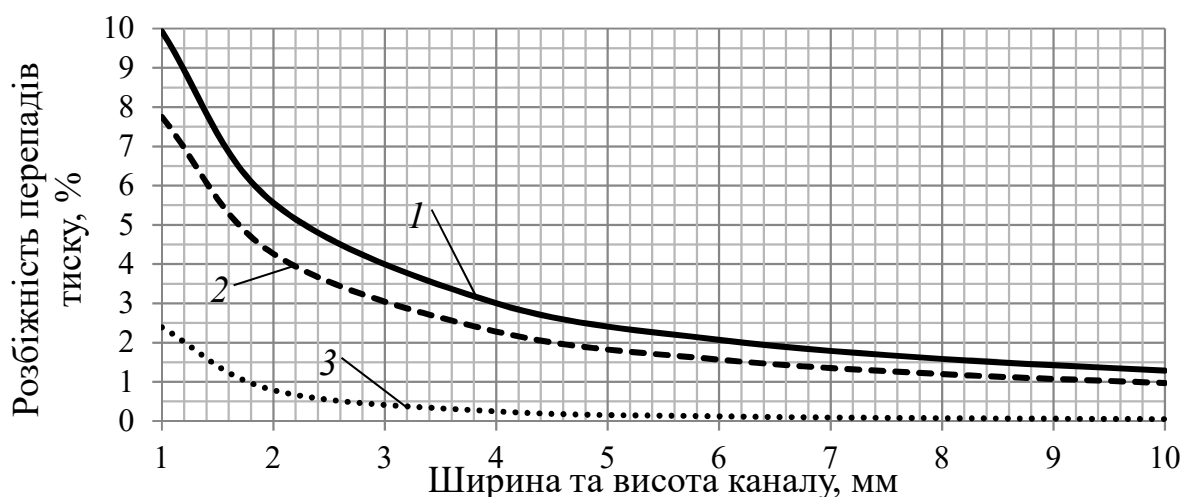


Рис. 3.22. Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від ширини та висоти каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.22, залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від ширини та висоти каналу має вигляд степеневого закону.

Для визначення величини впливу ширини та висоти каналу на розбіжність у перепадах тисків під час течії без змащування та зі змащуванням було проведено низку досліджень за різних діаметрів каналу в діапазоні від 1 до 10 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від ширини та висоти каналу (рис. 3.23).

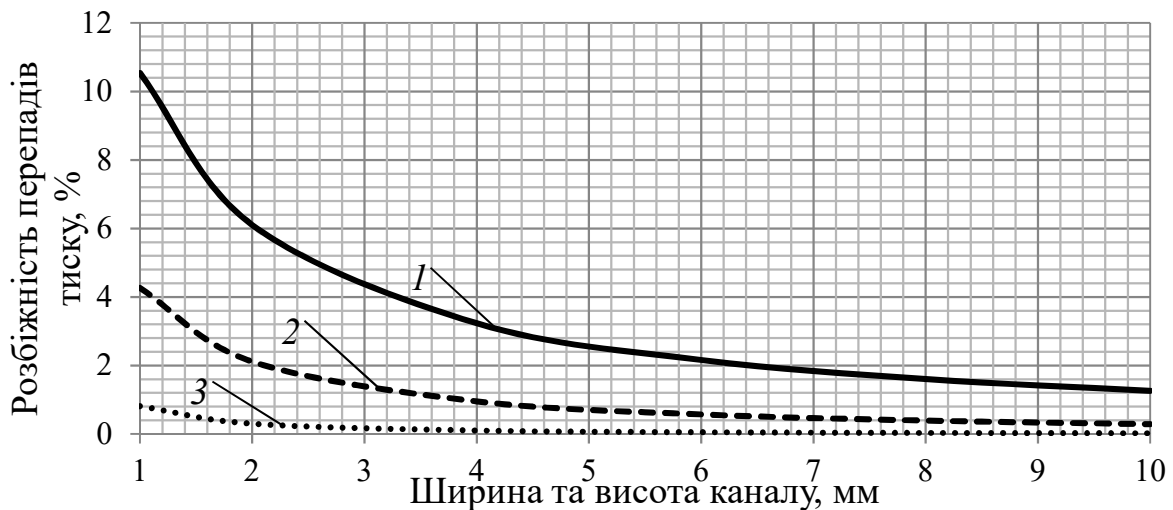


Рис. 3.23. Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від ширини та висоти каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.23, залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від ширини та висоти каналу має вигляд степеневого закону.

Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів несуттєвий при розмірах каналу, більших за 5 мм, та збільшується на каналах менших діаметрів, досягаючи 10 %.

Для визначення величини впливу довжини каналу на розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів та з їх урахуванням було проведено низку досліджень за різних величин довжини каналу в діапазоні від 5 до 100 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу (рис. 3.24).

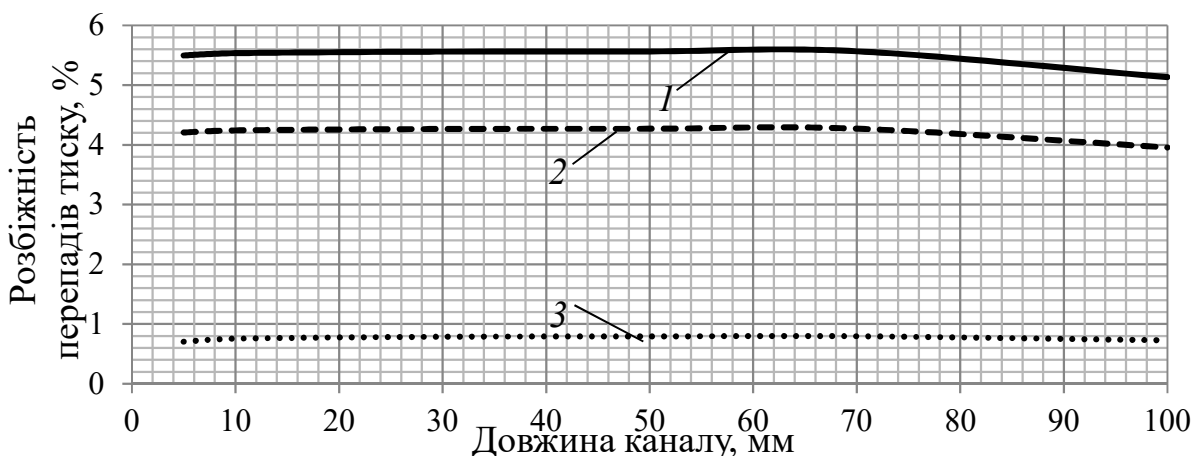


Рис. 3.24. Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.24, залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від довжини каналу має несуттєвий вплив на розбіжність перепадів тиску.

Для визначення величини впливу довжини каналу на розбіжність у перепадах тисків під час течії без змащування та зі змащуванням було проведено низку досліджень за різних величин довжини каналу в діапазоні від 5 до 100 мм, що дозволило побудувати криву залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу (рис. 3.25).



Рис. 3.25. Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.25, залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від довжини каналу має несуттєвий вплив на розбіжність перепадів тиску.

Для визначення величини впливу відношення ширини до висоти каналу (H/V) каналу на розбіжність у перепадах тиску без урахування пристінних ефектів та з їх урахуванням було проведено низку досліджень за різних відношень H/V каналу в діапазоні від 1 до 10, що дозволило побудувати криві залежності розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення H/V каналу (рис. 3.26).

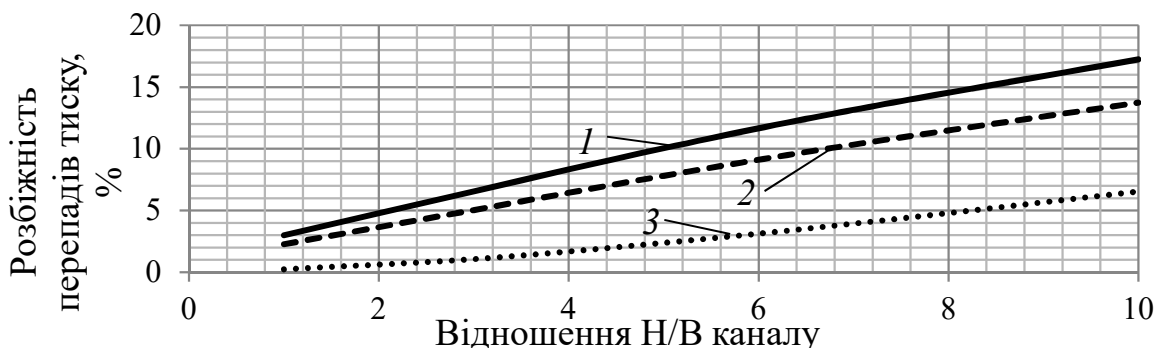


Рис. 3.26. Залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення H/V каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.26, залежність розбіжності перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів від відношення H/B каналу має вигляд степеневого закону.

Для визначення величини впливу відношення H/B каналу на розбіжність у перепадах тисків під час течії без змащування та зі змащуванням було проведено низку досліджень за різних відношень H/B каналу в діапазоні від 1 до 10, що дозволило побудувати криві залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення H/B каналу (рис. 3.27).

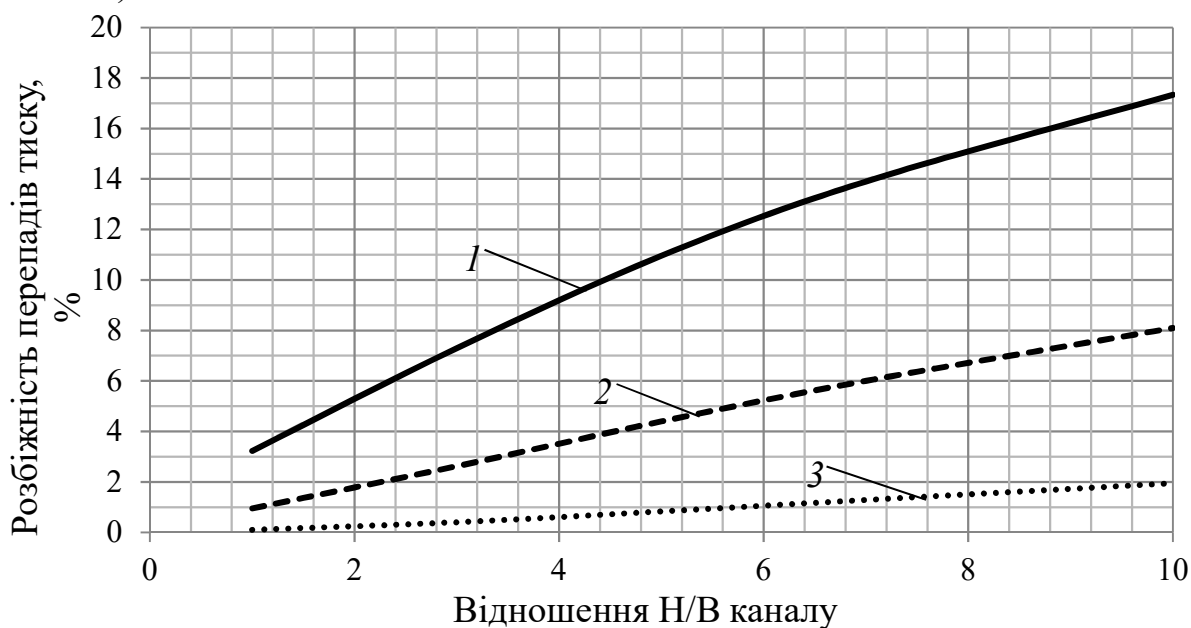


Рис. 3.27. Залежність розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення H/B каналу: 1 – ПС-С-1-3; 2 – ПЕВТ 15803-020; 3 – Севілен 11104-030

Як видно з рис. 3.27, залежності розбіжності перепаду тиску між течією без та зі змащувальним агентом від відношення H/B каналу мають вигляд степеневого закону.

Результати досліджень показують, що вплив пристінних ефектів суттєвий у всьому діапазоні відношень H/B .

3.3.3. Результати моделювання для каналу з геометрією формуючої головки

З метою оцінки величини впливу пристінних ефектів на параметри течії полімерного матеріалу через формуючу головку переробного обладнання було здійснено моделювання течії розплаву полімерного матеріалу в каналі формуючої головки.

На рис. 3.28 наведена залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для ПЕВТ 15803-020.

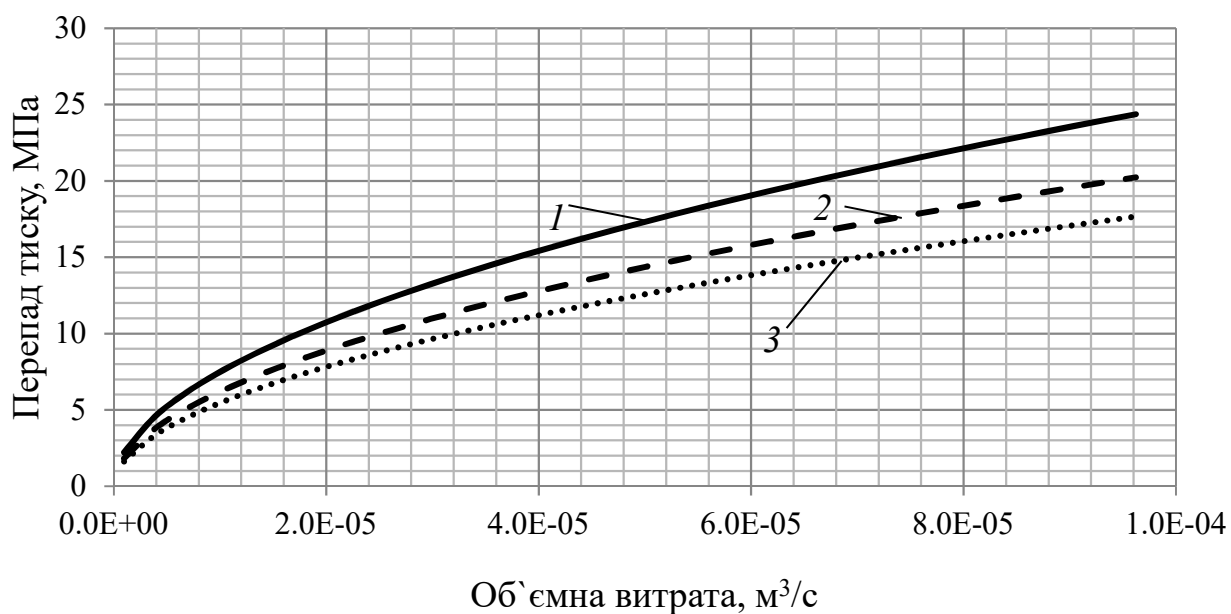


Рис. 3.28. Залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для ПЕВТ 15803-020:
1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змазкою

Як видно з рис. 3.28, відсутність врахування пристінних ефектів під час числового моделювання течії ПЕВТ 15803-020 в каналі формуючої головки переробного обладнання призводить до значної похибки у результатах, яка може сягати 22 %.

На рис. 3.29 наведена залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для полістиролу ПС-С-1-3.

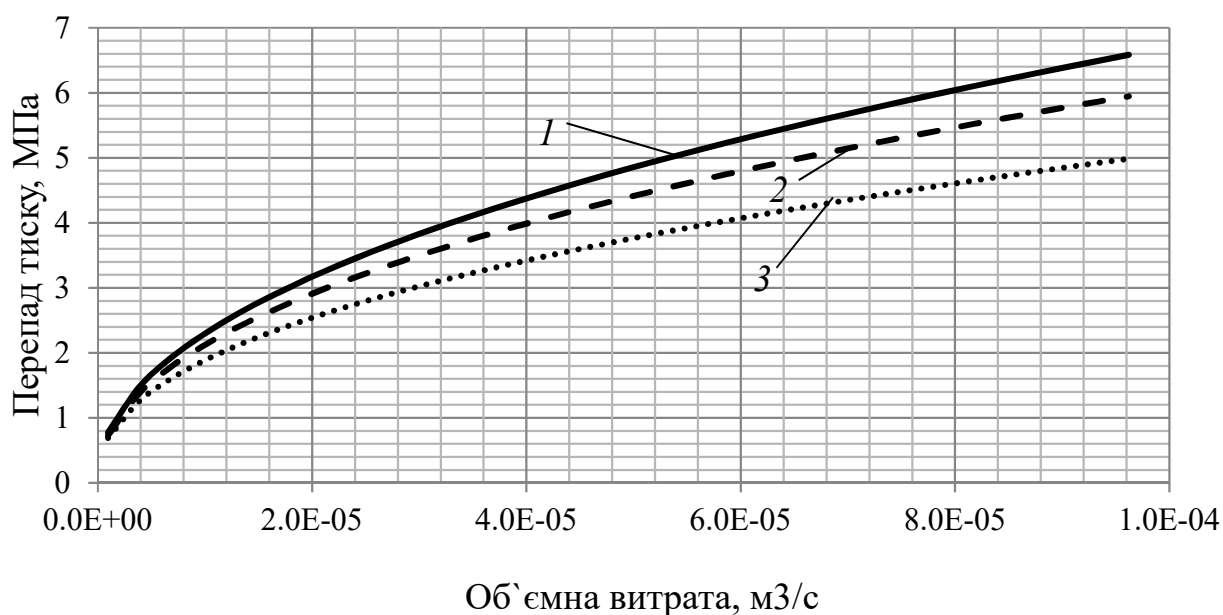


Рис. 3.29. Залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для ПС-С-1-3:
1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змазкою

Як видно з рис. 3.29, відсутність врахування пристінних ефектів під час числового моделювання течії ПС-С-1-3 в каналі формуючої головки переробного обладнання призводить до значної похибки в результатах, яка може сягати 11 %.

На рис. 3.30 наведена залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для севілену 11104-030.

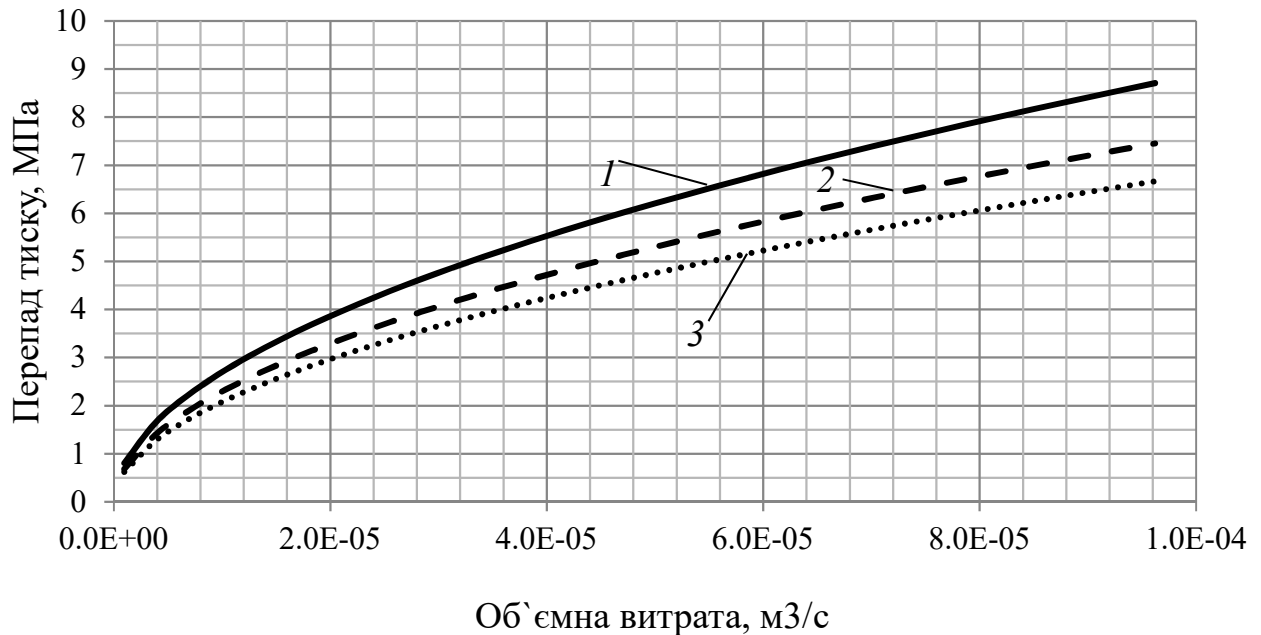


Рис. 3.30. Залежність перепаду тиску від об'ємної витрати для севілену 11104-030:
1 – без ковзання; 2 – ковзання по стінці; 3 – ковзання зі змазкою

Як видно з рис. 3.30, відсутність врахування пристінних ефектів під час числового моделювання течії севілену 11104-030 в каналі формуючої головки переробного обладнання призводить до значної похибки у результатах, яка може сягати 17 %.

3.4. Регресивні математичні моделі

На практиці часто потрібно оцінити параметри певної системи, тобто побудувати її математичну модель і знайти числові значення параметрів цієї моделі. Як вихідні дані для побудови моделі є результати експерименту, який представляє собою сукупність декількох вимірювань, виконаних за певним планом.

Повний факторний експеримент [110, 111] – сукупність кількох вимірів, що задовольняють такі умови:

- кількість вимірювань становить n^k , де n – кількість рівнів, k – кількість факторів;
- кожен фактор приймає не менше двох значень;

– у процесі вимірювання всі значення факторів комбінуються у всіх можливих поєднаннях.

Перевагами повного факторного експерименту є:

– простота розв'язку системи рівнянь оцінювання параметрів;
– статистична надмірність кількості вимірювань, яка зменшує вплив похибок окремих вимірювань на оцінку параметрів.

3.4.1. Регресивна модель пристінних ефектів у конічному каналі

Для виявлення ступенів впливу геометричних параметрів конічного каналу на процес течії розплаву полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів необхідно провести повний факторний експеримент, що дозволить отримати регресивну математичну модель пристінних ефектів для кожного з досліджуваних матеріалів.

Фактори, які впливають на процес течії розплаву полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів та вплив яких буде досліджуватися:

- 1) довжина каналу;
- 2) діаметр входу каналу;
- 3) співвідношення діаметра входу до діаметра виходу з каналу.

У зв'язку з тим, що раніше визначені в п. 3.3 залежності впливу окремих геометричних параметрів на величину пристінних ефектів мають нелінійний характер, необхідно проводити експеримент для кожного з параметрів по трьом рівням.

Кількість дослідів, необхідна для реалізації всіх можливих поєднань рівнів факторів

$$N = 3^k = 3^3 = 27 \text{ дослідів,}$$

де k – кількість факторів, що впливають на процес.

Розглянемо конічну геометрію. Визначимо граничні значення для кожного з факторів, вплив яких буде досліджуватись.

- 1) довжина каналу – $L = 10\text{--}50$ мм;
- 2) діаметр на вході у канал – $D_{\text{вх}} = 0,5\text{--}10$ мм;
- 3) співвідношення діаметра входу до діаметра виходу з каналу – $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}} = 1\text{--}5$.

Вихідним фактором, який буде характеризувати вплив пристінних ефектів на процес течії розплаву полімерного матеріалу, буде розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням.

Щоб полегшити розв'язання системи, проведемо нормування факторів. Верхнім значенням факторів привласнимо нормоване значення «+1», нижнім значенням – нормоване значення «-1», середнім значенням «0» та проведемо всі необхідні досліді.

Розв'язання системи здійснювалося за допомогою програмного комплексу регресивного аналізу ReliaSoft DOE+. Коефіцієнт детермінації регресивних моделей знаходився в межах 0,95.

Взявши абсолютні значення коефіцієнтів регресії при вхідних параметрах у нормованих координатах, можна отримати внесок кожного з факторів у вихідне значення розбіжності у перепадах тиску без урахування пристінних ефектів та з їх урахуванням (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Коефіцієнти регресії в нормованих координатах

Матеріал	Діаметр каналу, %	Довжина каналу, %	Відношення $D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$, %
ПЕВТ 15803-020	66,86	8,66	24,49
ПС-С-1-3	62,62	4,27	33,11
Севілен 11104-030	68,57	7,64	23,79

Як видно з табл. 3.1, максимальний вплив на процес чинить діаметр каналу, а мінімальний – довжина каналу.

У результаті регресивного аналізу отримаємо значення коефіцієнтів регресії моделі в нормованих координатах (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Коефіцієнти регресії в нормованих координатах

Параметр	Коефіцієнти регресії		
	Севілен 11104-030	ПЕВТ 15803-020	ПС-С-1-3
$D_{\text{вх}}$	-15,6582	-14,0626	-18,8729
L	1,7443	1,821	1,2859
$D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$	5,4332	5,1508	9,9788
$D_{\text{вх}} \cdot L$	-2,1939	-2,3708	-1,4587
$D_{\text{вх}} \cdot D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$	-5,9874	-6,034	-9,0766
$L \cdot D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$	0,0146	-0,0083	0,0746
$D_{\text{вх}} \cdot L \cdot D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$	0,4018	0,3774	0,4949

Як видно з результатів аналізу, коефіцієнти регресії, наведені у табл. 3.2, для комбінації ефектів факторів $L \cdot D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ та $D_{\text{вх}} \cdot L \cdot D_{\text{вх}}/D_{\text{вих}}$ мають надто малий вплив (менше 5 %) на систему для всіх досліджуваних матеріалів. У зв'язку з цим для оптимізації та скорочення моделі проводився додатковий аналіз без врахування цих коефіцієнтів.

Результатом регресивного аналізу для каналу конічної геометрії стало отримання регресивних математичних моделей для врахування впливу пристінних ефектів на розбіжність величини перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів для ПЕВТ 15803-020

$$\Delta P_{\text{розр}} = 2,83 - 306,4 D_{\text{вх}} + 222,07 L + 5,91 \frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вих}}} - 24955 D_{\text{вх}} L - 635,16 \frac{D_{\text{хв}}^2}{D_{\text{вих}}},$$

для полістиролу ПС-С-1-3

$$\Delta P_{\text{розр}} = 2,75 - 646,3 D_{\text{вх}} + 144,91 L + 10,01 \frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вих}}} - 15354 D_{\text{вх}} L - 955,43 \frac{D_{\text{хв}}^2}{D_{\text{вих}}},$$

для севілену 11104-030

$$\Delta P_{\text{розр}} = 6,44 - 712,88 D_{\text{вх}} + 208,46 L + 6,03 \frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вих}}} - 23094 D_{\text{вх}} L - 630,26 \frac{D_{\text{хв}}^2}{D_{\text{вих}}}.$$

Отримані регресивні математичні моделі дозволяють здійснювати наближений розрахунок перепаду тиску у каналі з урахуванням пристінних ефектів без необхідності проведення числового моделювання.

3.4.2. Регресивна модель пристінних ефектів у прямокутному каналі

Для виявлення ступенів впливу геометричних параметрів прямокутного каналу на процес течії розплаву полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів необхідно провести повний факторний експеримент, що дозволить отримати регресивну математичну модель пристінних ефектів для кожного з досліджуваних матеріалів.

Фактори, які впливають на процес течії розплаву полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів та вплив яких буде досліджуватися:

- 1) довжина каналу;
- 2) ширина та висота каналу;
- 3) співвідношення ширини до висоти каналу.

У зв'язку з тим, що раніше визначені у п. 3.3 залежності впливу окремих геометричних параметрів на величину пристінних ефектів, мають нелінійний характер, необхідно проводити експеримент для кожного з параметрів по трьом рівням.

Кількість дослідів, необхідна для реалізації всіх можливих поєднань рівнів факторів

$$N = 3^k = 3^3 = 27 \text{ дослідів,}$$

де k – кількість факторів, що впливають на процес.

Розглянемо прямокутну геометрію. Визначимо граничні значення для кожного з факторів, вплив яких буде досліджуватись.

- 1) довжина каналу – $L = 10\text{--}50$ мм;
- 2) ширина каналу – $H = 0,5\text{--}10$ мм;

3) співвідношення ширини до висоти каналу – $H/B = 1-5$.

Вихідним фактором, який буде характеризувати вплив пристінних ефектів на процес течії розплаву полімерного матеріалу буде розбіжність у перепадах тисків без урахування пристінних ефектів, та з їх урахуванням.

Щоб полегшити розв'язання системи, проведемо нормування факторів. Верхнім значенням факторів привласнимо нормоване значення «+1», нижнім значенням – нормоване значення «-1», середнім значенням «0» та проведемо всі необхідні дослід.

Розв'язання системи здійснювалося за допомогою програмного комплексу регресивного аналізу ReliaSoft DOE+.

Взявши абсолютні значення коефіцієнтів регресії при вхідних параметрах у нормованих координатах можна отримати внесок кожного з факторів у вихідне значення розбіжності у перепадах тиску без урахування пристінних ефектів та з їх урахуванням (табл. 3.3).

Таблиця 3.3. Коефіцієнти регресії в нормованих координатах

Матеріал	Ширина каналу, %	Довжина каналу, %	Відношення H/B , %
ПЕВТ 15803-020	63,81	8,73	27,45
ПС-С-1-3	60,68	11,61	27,71
Севілен 11104-030	64,29	8,32	27,39

Як видно з табл. 3.3, максимальний вплив на процес чинить ширина каналу, а мінімальний – довжина каналу.

У результаті регресивного аналізу отримаємо значення коефіцієнтів регресії моделі у нормованих координатах (табл. 3.4).

Таблиця 3.4. Коефіцієнти регресії у нормованих координатах

Параметр	Коефіцієнти регресії		
	Севілен 11104-030	ПЕВТ 15803-020	ПС-С-1-3
H	-11,0121	-9,2670	-6,8492
L	-1,4252	-1,2679	-1,3107
H/B	4,6915	3,9869	3,1279
$H \cdot L$	2,2147	1,9457	2,0054
$H \cdot H/B$	-3,9394	-3,6125	-4,1130
$L \cdot H/B$	-0,5962	-0,5770	-0,7795
$H \cdot L \cdot H/B$	0,8541	0,8664	1,1855

Як видно з результатів аналізу, коефіцієнти регресії, наведені в табл. 3.4, для комбінації ефектів факторів $L \cdot H/B$ та $H \cdot L \cdot H/B$ мають надто малий вплив (менше 5 %) на систему для всіх досліджуваних матеріалів. У зв'язку з цим, для

оптимізації та скорочення моделі, проводився додатковий аналіз без врахування цих коефіцієнтів.

Результатом регресивного аналізу для каналу конічної геометрії стало отримання регресивних математичних моделей для врахування впливу пристінних ефектів на розбіжність величини перепаду тиску між відсутністю та врахуванням пристінних ефектів для ПЕВТ 15803-020

$$\Delta P_{розр} = 12,37 - 1424,58H - 170,92L + 3,99\frac{H}{B} + 20481HL - 380,26\frac{H^2}{B},$$

для полістиролу ПС-С-1-3

$$\Delta P_{розр} = 6,35 - 776,37H - 176,36L + 3,84\frac{H}{B} + 21109HL - 432,94\frac{H^2}{B},$$

для севілену 11104-030

$$\Delta P_{розр} = 15,4 - 1773,67H - 193,65L + 4,52\frac{H}{B} + 23312HL - 414,67\frac{H^2}{B}.$$

Отримані регресивні математичні моделі дозволяють здійснювати наближений розрахунок перепаду тиску в каналі з урахуванням пристінних ефектів без необхідності проведення числового моделювання.

3.5. Висновки

Було доповнено існуючу математичну модель течії полімерних матеріалів врахуванням пристінних ефектів та створено методики визначення параметрів матеріалів залежно від природи виникнення пристінних ефектів.

Для перевірки адекватності математичної моделі та отриманих параметрів матеріалу було здійснено порівняння залежностей перепаду тиску від об'ємної витрати, отриманих експериментально та моделюванням з урахуванням пристінних ефектів, а також порівняння з існуючими результатами. Дані, отримані при моделюванні, відрізняються від експериментальних не більше ніж на 5 %, а порівняно з існуючими результатами не більше ніж на 20 %, що пояснюється різним підходом до визначення параметрів матеріалу, граничних умов та відмінностей у математичних моделях. Прийнятна збіжність з експериментальними даними та існуючими результатами свідчить про адекватність розробленої моделі.

За результатами числового моделювання процесу течії полімерного матеріалу з урахуванням пристінних ефектів отримано залежності величин впливу пристінних ефектів на параметри процесу течії для циліндричного та прямокутного каналів.

Для оцінки величини впливу пристінних ефектів під час числового моделювання на геометрії формуючої головки було здійснено додаткове

моделювання, яке показало, що нехтування пристінними ефектами під час числового моделювання призводить до похибки в отриманих значеннях від 11 до 22 % залежно від матеріалу.

Числове моделювання дозволило одержати регресивні математичні моделі для врахування впливу пристінних ефектів на параметри процесу течії, які дозволяють здійснювати наближений розрахунок перепаду тиску в каналі з урахуванням пристінних ефектів без необхідності проведення числового моделювання, [112–125].

4. ВПРОВАДЖЕННЯ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

У процесі виконання досліджень було розроблено нові конструкції екструзійних головок, черв'яка екструдера, а також на базі здійсненого числового моделювання проведено уточнення моделей переробного обладнанн.

4.1. Головка екструзійна

Розроблена конструкція екструзійної головки (рис. 4.1) дозволяє забезпечити поглинання пульсацій розплаву, що приводить до зменшення кількості виробів з дефектами поверхні [126]. Це досягається встановленням демпфуючого та пружного елементів з можливістю поглинання пульсацій розплаву та зміни площі поперечного перерізу каналу, по якому рухається розплав.

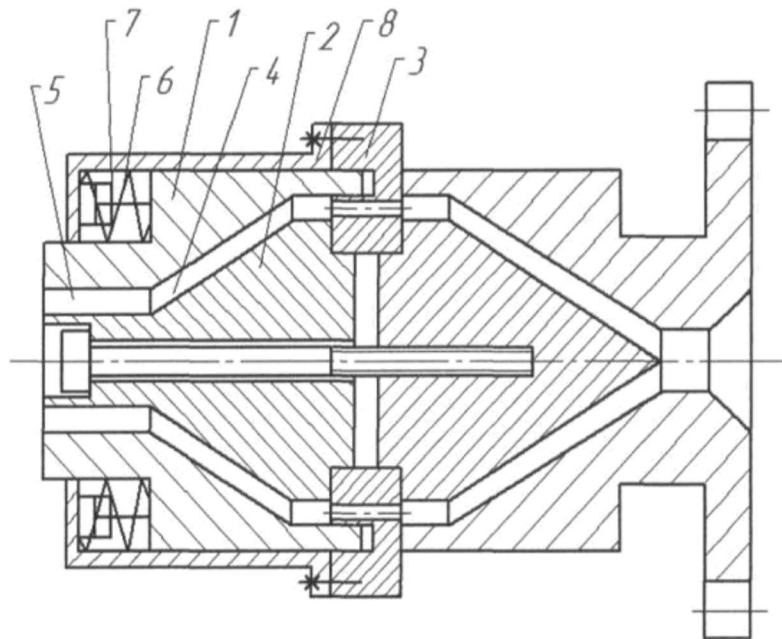


Рис. 4.1. Конструкція екструзійної головки (пояснення в тексті)

Кільцева екструзійна головка (див. рис. 4.1) містить матрицю 1, що формує зовнішню поверхню полімерного виробу, та дорн 2, що формує внутрішню поверхню виробу. Дорн 2 і матриця 1 закріплені в дорнотримачі 3, утворюючи канал 4 для протікання розплаву з вихідною ділянкою 5, причому матриця може рухатись зворотньо-поступально вздовж осі, змінюючи переріз каналу 4. На матриці 1 встановлено пружний 6 і демпфуючий 7 елементи, що передають зусилля від неї на кришку 8.

Розплав, що надходить у головку, потрапляє в канал 4 між внутрішньою поверхнею матриці 1 та зовнішньою поверхнею дорна 2, утворюючи перепад

тиску, що приводить до утворення сили, яка переміщує матрицю *1* в осьовому напрямку. При цьому поперечний переріз каналу *4* збільшується, а тиск у ньому починає зменшуватись. Матриця *1*, переміщуючись в осьовому напрямку, передає зусилля на кришку *8* через демпфер *7*, який зменшує швидкість переміщення, і пружину *6*, яка намагається відвести матрицю в початкове положення. Так як процес відбувається безперервно, то матриця виконує зворотно-поступальні рухи, тим самим поглинаючи пульсації.

4.2. Головка екструзійна

Розроблена конструкція екструзійної головки (рис. 4.2) дозволяє забезпечити поглинання пульсацій розплаву, що призводить до зменшення кількості виробів з дефектами поверхні [127]. Це досягається виконанням дорнотримача з двох частин з можливістю зворотно-поступального руху однієї частини відносно іншої, матриця і вихідна частина дорну закріплені на рухомій частині дорнотримача таким чином, що довжина каналу має можливість змінюватись.

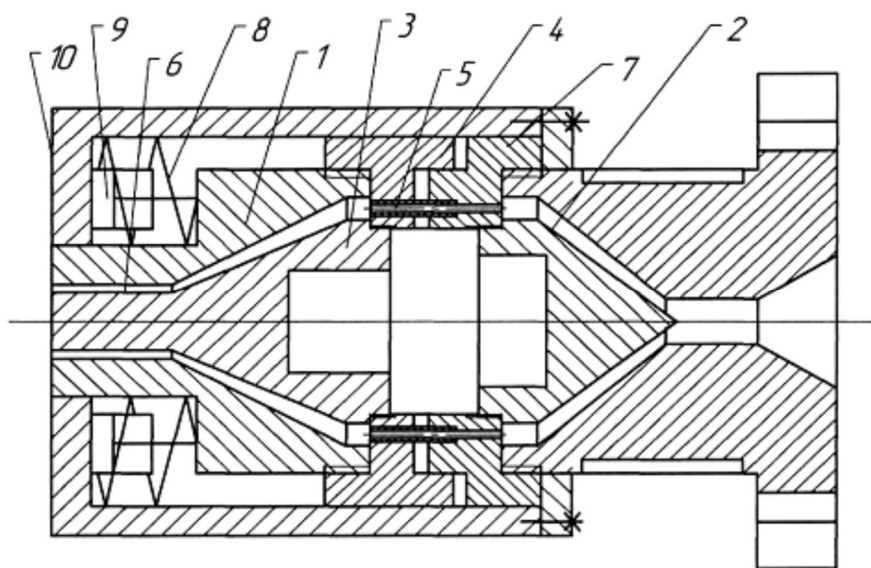


Рис. 4.2. Конструкція екструзійної головки (пояснення в тексті)

Кільцева екструзійна головка (див. рис. 4.2) містить матрицю *1*, що формує зовнішню поверхню полімерного виробу, та дорн, що формує внутрішню поверхню виробу і який складається з вхідної частини *2* та вихідної частини *3*. Вихідна частина дорну *3* і матриця *1* закріплені в рухомій частині дорнотримача *4*, утворюючи канал *5* для протікання розплаву з вихідною ділянкою *6*, причому матриця *1* і вихідна частина дорну *3* можуть рухатись зворотно-поступально вздовж осі, відносно нерухомої частини дорнотримача *7*, змінюючи довжину каналу *5*. На матриці *1* встановлено пружний *8* і демпфуючий *9* елементи, що передають зусилля від неї на кришку *10*. Корисна

модель працює таким чином. Розплав, що входить у головку, потрапляє в канали 5 та 6, при цьому між вихідною частиною дорна 3 та вхідною частиною 2, утворюючи перепад тиску, що призводить до утворення осьової сили, яка переміщує матрицю 1 з вихідною частиною дорна 3 і рухомою частиною дорнотримача 4 відносно нерухомої частини дорнотримача 7. При цьому довжина каналу 5 збільшується, а тиск в головці починає зменшуватись. Матриця 1, переміщуючись в осьовому напрямку, передає зусилля на кришку 10 через демпфер 9, який зменшує швидкість переміщення, і пружину 8, яка намагається відвести матрицю в початкове положення. Оскільки процес відбувається безперервно, то матриця з вихідною частиною дорна виконує зворотно-поступальні рухи, тим самим поглинаючи пульсації.

4.3. Черв'як екструдера

Розроблена конструкція черв'яка екструдера (рис. 4.3) дозволяє забезпечити поглинання пульсацій тиску, що призводить до поліпшення умов роботи черв'ячних екструдерів [128]. Це досягається спорядженням наконечника з боку хвостовика вала штоком з розташованим на його кінці поршнем, при цьому ділянка осьового отвору вала між наконечником і поршнем заповнена в'язкою рідиною, а в осьовому отворі вала на зазначеній ділянці закріплено нерухому дросельну шайбу.

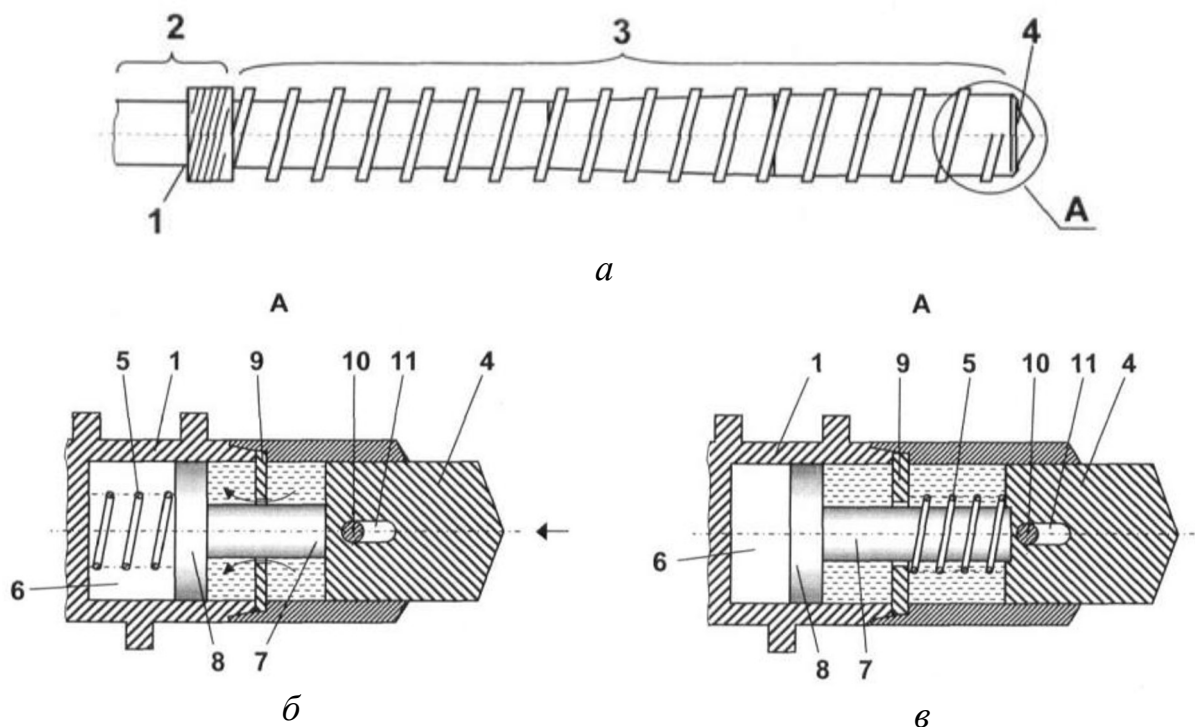


Рис. 4.3. Конструкція екструзійної головки: а – загальний вигляд черв'яка; б – приклад розташування пружного елемента між поршнем та дном осьового отвору вала; в – приклад розташування пружного елемента між наконечником і дросельною шайбою

Черв'як екструдера містить вал 1 з послідовно розташованими хвостовиком 2, робочою зоною 3 з гвинтовою нарізкою, а також наконечником 4, спорядженим пружним елементом 5 (наприклад, пружиною стиснення) і встановленим з можливістю зворотно-поступального руху в осьовому отворі 6 вала 1. Наконечник 4 з боку хвостовика вала 2 споряджено штоком 7 з розташованим на його кінці поршнем 8, при цьому ділянка осьового отвору 6 вала 1 між наконечником 4 і поршнем 8 заповнено в'язкою рідиною, а в осьовому отворі 6 вала 1 на зазначеній ділянці закріплено нерухому дросельну шайбу 9. Штифт 10, що проходить крізь овальний отвір 11 наконечника 4, фіксує його від провертання відносно робочої зони 3 черв'яка (рис. 4.3, а). Пружний елемент 5 при цьому може бути встановлено або між поршнем 8 і дном осьового отвору 6 вала 1 (рис. 4.3, б), або між наконечником 4 і дросельною шайбою 9 (рис. 4.3, в). Черв'як працює в такий спосіб. Сировина, що підлягає переробленню, послідовно просувається нарізкою робочої частини 3 від хвостовика 2 до наконечника 5, поступово ущільнюється, нагрівається і плавиться. Під час раптового небажаного підвищення тиску з боку екструзійної головки відбувається переміщення наконечника 4 у бік хвостовика 2 черв'яка, а отже скорочення загальної довжини черв'яка та збільшення об'єму робочого каналу екструдера з боку наконечника 4, що сприяє зниженню тиску. Також під час руху наконечника 2 в осьовому отворі 6 вала 1 відбувається поступове перетікання в'язкої рідини з об'єму перед дросельною шайбою 9 в об'єм за неї (тобто здійснюється достатньо повільний рух наконечника 4). Після певного зниження тиску наконечник 4 повністю або частково повертається у вихідне положення, після чого тиск у робочому каналі екструдера стабілізується. При цьому незалежно від пропускної здатності дросельної шайби 9 та жорсткості пружного елемента 5 забезпечується ефективно "гасіння" коливань тиску на вході в екструзійну головку екструдера.

4.4. Впровадження результатів науково-технічних розробок

Було розроблено та передано до використання на ПАТ «НВП «Більшовик» науково-технічний продукт у вигляді методики автоматизованого проектування та 3D-моделей обладнання для виготовлення полімерних та гумотехнічних виробів, у якому застосовано сучасний підхід до проектування та моделювання з урахуванням пристінних ефектів.

Створені тривимірні моделі конструкцій та вузлів дозволяють більш точно обґрунтувати вибір їх геометричних і конструктивних параметрів та уникнути багатьох помилок, характерних при використанні традиційного підходу.

Було встановлено, що використання запропонованої методики автоматизованого проектування та конструктивних пропозицій дозволяє вдосконалити технологічні параметри процесів та конструкції робочих органів,

за яких забезпечується підвищена продуктивність та якість виробів за умов зниження енергоємності процесів їх виробництва.

4.5. Висновки

Розроблено конструкції екструзійних головок, що дозволяють компенсувати вплив пульсацій розплаву, які виникають внаслідок дії пристінних ефектів [126–129].

Результати роботи впроваджено в ПАТ «НВП «Більшовик» (м. Київ) при проектуванні та виготовленні переробного обладнання.

5. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ КОНСТРУЮВАННЯ ЕКСТРУЗІЙНИХ ГОЛОВОК

5.1. Класифікація екструзійних головок

Екструзійні головки класифікують за такими ознаками:

1. За напрямом виходу виробу:

- прямотечійні, у яких напрям виходу розплаву збігається з віссю черв'яка;
- кутові, частіше за все напрям виходу розплаву в них повернуто на 90° відносно осі черв'яка;

– офсетні, які є різновидом кутових і в яких здійснюється подвійний поворот, унаслідок чого виріб формується в напрямі, паралельному осі екструдера. Такі головки можуть застосовуватися для багатоструминної екструзії, для виготовлення певних видів кабелів або профілів з осердям.

2. За конфігурацією формуючої щілини:

- плоскощілинні;
- кільцеві;
- гранулювальні;
- профільні.

3. За призначенням:

1) головки для грануляції:

- а) для гарячої грануляції, або грануляції на решітці;
- б) для холодної грануляції, або стренгової грануляції;

2) головки для рукавної плівки:

- а) для одношарових плівок;
- б) для багатошарових плівок;

3) плоскощілинні головки для плоскої плівки й листів:

- а) для одношарових плівок і листів;
- б) для багатошарових плівок і листів;

4) головки для виробництва труб, рукавів та армованих шлангів:

- а) для виробництва напірних труб;
 - б) для виготовлення армованих плоскозгорнутих рукавів;
 - в) для виробництва армованих шлангів;
 - г) для виробництва гофрованих труб;
 - д) для виготовлення гнучких повітроводів, гнучких шлангів, труб великого діаметра навивкою стрічки або профілю на оправку з подальшим їх зварюванням;
 - е) головки для виробництва труб з теплоізоляцією;
 - ж) головки для виробництва багатоканальних труб;
 - з) головки для виробництва багатошарових труб методом співекструзії;
- 5) профільні головки:

- а) головки для виготовлення трубоподібних профілів;
- б) головки для виготовлення порожнистих профільних виробів;
- в) екструзійні головки для виробництва камерних профілів (наприклад, віконних профілів, підвіконь тощо);
- г) головки для виробництва багатошарових (комбінованих) профілів;
- д) головки для виготовлення армованих виробів (у т.ч. кабельні головки);
- 6) головки для виготовлення виробів методом екструзії з роздуванням;
- 7) головки для виробництва моно- і бікомпонентних волокон (останні – співекструзією).

5.2. Чинники, що враховуються під час конструювання головок

Геометричні параметри формуючих каналів, а отже і конструктивне оформлення головки визначається реологічними властивостями розплаву й вимогами до виробу [14, 130–132].

Гідравлічний опір каналів головки має перебувати в області оптимальних робочих характеристик екструдера. Це означає необхідність узгодження типорозміру машини, геометрії черв'яка й технологічних режимів з геометрією виробу, каналів головки й потрібною продуктивністю.

Розподіл швидкостей розплаву на виході з головки має бути максимально однорідним. Невиконання цієї умови призводить до різнотовщинності виробу, утворенню складок і вигинів профілю у напрямі ділянок з меншою швидкістю.

Частково ці явища можна компенсувати за рахунок прийому виробу з швидкістю, більшою за максимальну швидкість виходу розплаву з формуючої щілини (так звана фільєрна витяжка), застосуванням пристроїв регулювання товщини щілини або установкою додаткових калібрувальних пристроїв.

Фільєрна витяжка не повинна перевищувати певної величини (зазвичай 10–20 %, хоча буває і більше – до 100 %), щоб уникнути розривів профілю і появи залишкових напружень, що призводить до викривлення виробу та зміни його форми.

Розміри формуючих каналів мають проектуватися з урахуванням витяжки, усадки й розбухання екструдату.

За високої швидкості екструзії можуть створитися умови досягнення граничної адгезійної міцності та внаслідок вискоеластичної турбуленції виникати дефекти поверхні виробів. Це явище прогнозується по досягненню теоретичної або експериментально визначеної критичної швидкості зсуву.

Потрібно уникати різких перепадів поперечного перерізу каналу, за яких критична швидкість зсуву знижується. Кути переходів мають бути по можливості малими або такими, що плавно зменшуються. Форма перерізу

каналу має забезпечити відсутність застійних зон («мертвих» зон). Передні й задні кути звужень і розширень каналів не повинні перевищувати 45–60°. Ці засоби знижують імовірність виникнення вискоеластичної турбулентції.

5.3. Основні конструктивні особливості екструзійних головок

Більшість екструзійних головок мають канали, що складаються із вхідних, розподільвальних і формуючих ділянок. Кінцеві форма й розміри профілю екструзійних виробів оформлюються мундштуком, який складається з матриці, що формує зовнішні поверхні виробу, і дорна, що формує внутрішні поверхні (рис. 5.1).

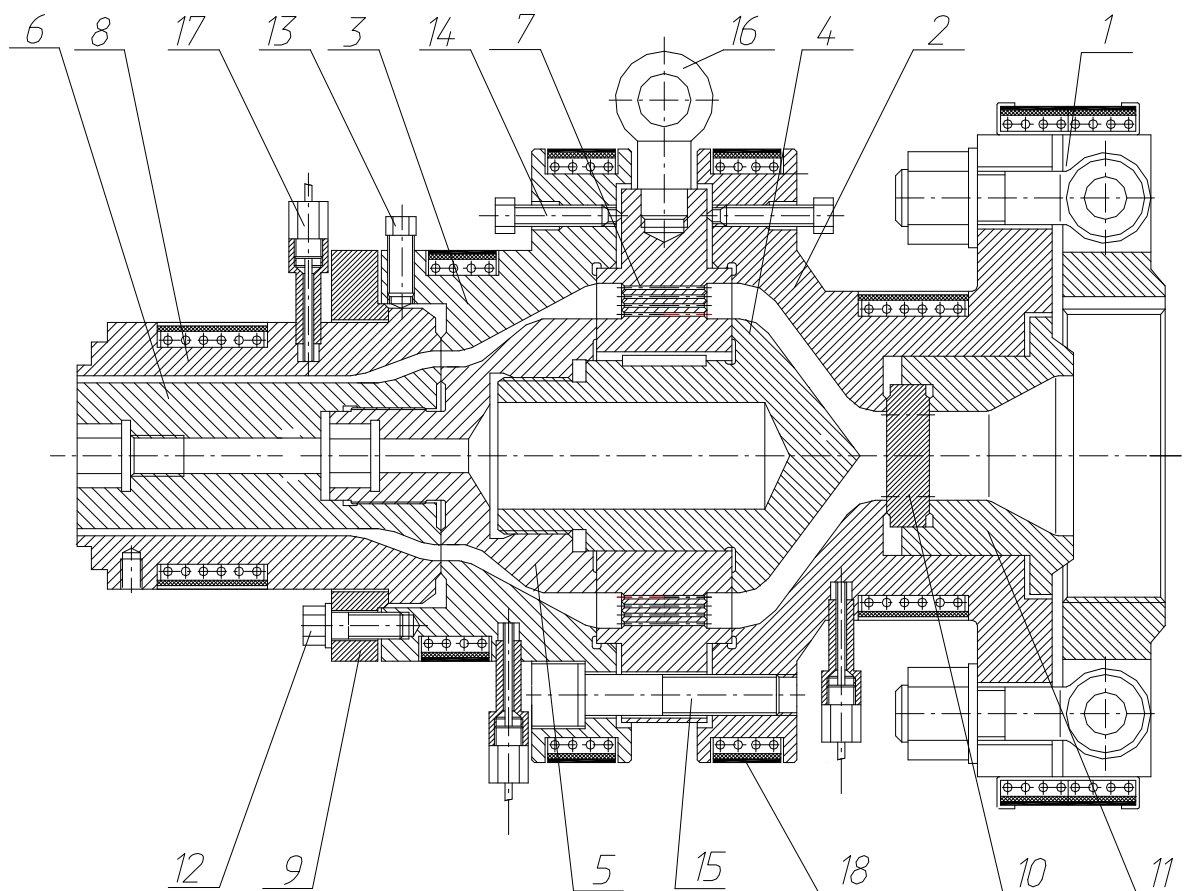


Рис. 5.1. Приклад конструкції головки для виробництва труб: 1 – фланець; 2 і 3 – частини рознімного корпусу; 4 – розсікач; 5 – проміжний дорн; 6 – формуючий дорн; 7 – дорнотримач; 8 – матриця; 9 – кільце; 10 – фільтрувальна решітка; 11 – втулка; 12, 14, 15 – болти кріпильні; 13 – болт регулювальний; 16 – рим-болт; 17 – термопара; 18 – нагрівники

Часто мундштуки виконують швидкозмінними для швидкого переходу на продукцію іншого типорозміру. Кріплення дорну проводиться на дорнотримачах різної конструкції. Зазвичай передбачається можливість регулювання товщини профілю в різних перерізах. На вході в головку часто

встановлюють решітку з пакетом сіток для фільтрування розплаву і створення потрібного перепаду тиску. Під час виробництва замкнутих профілів (труби, шланги і т.п.) всередину дорну під надлишковим тиском подають повітря для підтримки порожнини і для калібрування розмірів. Мундштук повинен мати на виході канал постійної геометрії для стабілізації течії розплаву полімеру.

5.4. Гідравлічний розрахунок головок

Для гідравлічного розрахунку головок застосовують два основних методи: метод ефективної в'язкості, а також точний метод розрахунку

5.4.1. Метод ефективної в'язкості

Заснований на допущенні подібності в'язкості на кожній геометрично постійній ділянці каналу, залежно від розрахованої швидкості зсуву на стінці для ньютонівської рідини.

Цей метод складається з таких стадій:

1) Розбиття каналів на ділянки з постійною геометрією або такою, що монотонно змінюється.

2) Визначення для кожної ділянки коефіцієнта геометричної форми K_i ($i = \overline{1, m}$; табл. 5.1).

3) Визначення продуктивності на кожній ділянці спільно з характеристикою екструдера ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$Q = \frac{K \alpha n}{K + \beta + \gamma},$$

де α – коефіцієнт прямого потоку, м^3 ; β – коефіцієнт зворотного потоку, м^3 ; γ – коефіцієнт потоку витоку, м^3 ; K – сумарний коефіцієнт геометричної форми головки, що складається з відповідних коефіцієнтів для кожної геометрично сталої ділянки, м^3 :

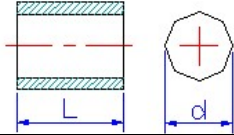
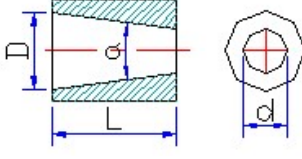
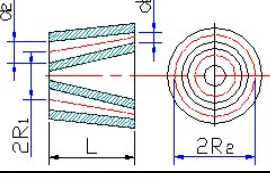
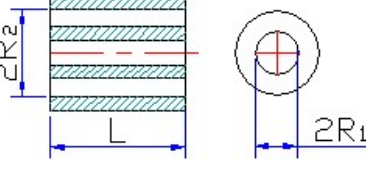
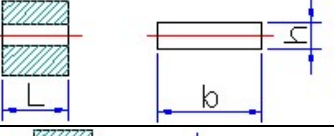
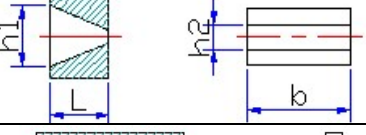
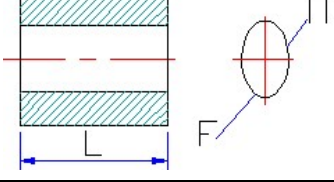
$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \dots + \frac{1}{K_m}} = \sum_{i=1}^m (K_i^{-1})^{-1}.$$

Для z паралельно розташованих каналів, наприклад каналів решітки, $K_i = z K'_i$, де K'_i – коефіцієнт геометричної форми для одного окремого елемента i -ї ділянки головки (наприклад, одного отвору решітки).

4) Визначення швидкості зсуву $\dot{\gamma}_i$ на стінці для кожної ділянки (див. табл. 5.1).

Для z паралельно розташованих каналів $\dot{\gamma}_i = \dot{\gamma}'_1 / z$, де $\dot{\gamma}'_1$ – швидкість зсуву на стінці одного окремого елемента i -ї ділянки головки.

Таблиця 5.1. Коефіцієнти геометричної форми та швидкості зсуву для ділянок каналів

Тип каналу	Ескіз	$K, \text{м}^3$	$\dot{\gamma}, \text{с}^{-1}$
Круглий циліндричний		$\frac{\pi d^4}{128L}$	$\frac{32Q}{\pi d^3}$
Круглий конічний з великим діаметром на вході		$\frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)}$	$\ddot{\epsilon}$
Конічний кільцевий з конічної щілиною ¹		$\frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6L\omega}$	$\frac{22,32Q}{\pi(R_1 + R_2)(\delta_1 + \delta_2)^2}$
Круглий кільцевий		$\frac{\pi}{8L} \left[R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right]$	$\frac{5,58Q}{\pi(R_1 + R_2)(R_2 - R_1)^2}$
Плоский щілинний		$\frac{bh^3}{12L}$	$\frac{5,58Q}{bh^2}$
Щілинний клиноподібний		$\frac{bh_1^2 h_2^2}{6L(h_1 + h_2)}$	$\frac{11,16Q}{b(h_1 + h_2)^2}$
Циліндричний з довільним поперечним перерізом ²		$\frac{F^3}{2L\Pi^2}$	$\frac{2Q\Pi}{F^2}$

Примітки:

$$1. \omega = \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1\delta_2 - R_2\delta_1} \right)^2 \ln \left(\frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} \right) - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2};$$

2. F – площа поперечного перерізу каналу, м^2 ; Π – периметр поперечного перерізу, м .

5) Для кожної ділянки каналу головки за кривою течії визначають ефективну в'язкість $\mu_{\text{еф}i}$ (Па·с).

б) Визначення перепаду тиску на кожній ділянці з урахуванням в'язкості як функції швидкості зсуву на стінці $\dot{\gamma}_i$ і температури.

Перепад тиску на ділянці, Па

$$\Delta P_i = \frac{Q \mu_{\text{еф}i}}{K_i},$$

де $\mu_{\text{еф}i}$ – ефективна в'язкість на кожній ділянці каналу.

Сумарний перепад тиску в головці, Па

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \dots + \Delta P_n.$$

Через відсутність урахування змін швидкості зсуву внаслідок змінних реологічних властивостей похибка під час визначення перепаду тиску може досягати 10–15 %.

5.4.2. Точний метод розрахунку

Цей метод ґрунтується на врахуванні закону реологічних властивостей розплаву.

Він складається з таких стадій:

- 1) Розбиття каналів як в методі ефективної в'язкості (див. п. 11.4.1).
- 2) Визначення для кожної ділянки продуктивності як функції реологічних характеристик і геометричної форми, перепаду тиску і швидкості зсуву як функції продуктивності, реологічних і геометричних параметрів.
- 3) Визначення реологічних параметрів з урахуванням визначених продуктивності і швидкості зсуву.
- 4) Визначення коефіцієнта геометричної форми ділянки каналу.
- 5) Визначення продуктивності як функції коефіцієнта геометричної форми і перепаду тиску:

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma}^n;$$

$$Q = K \Delta P^n.$$

Далі пп. 2–5 перераховується ітераційним шляхом.

Недолік цього методу – відповідні залежності з урахуванням неньютонівських властивостей перероблюваного матеріалу відомі для незначної кількості каналів простої геометрії.

Канали складнішої форми доводиться апроксимувати різними методами, що може призвести до певної похибки розрахунку.

Товщину стінки екструдованої трубчастої заготовки регулюють обертанням декількох регулювальних гвинтів 3. Прямотечійна частина головки відносно довга: її довжина становить 5–20 значень товщини труби. Якщо калібрувальну насадку не застосовують, то для одержання екструдату з більшою точністю розмірів це відношення збільшується до 20–40.

Тиск розплаву в головці перебуває в межах 15–20 МПа (рідше до 30 МПа). До дорна 10 кріпиться трос 5 або ланцюг, що втримує ущільнювальні пробки, які ковзають по внутрішній поверхні труби. Пробки потрібні також і для створення внутрішнього тиску в трубній заготовці для її калібрування по зовнішньому діаметра. Для калібрування по внутрішньому діаметра пробки не застосовують.

Довжина калібрувального каналу постійного поперечного перерізу на виході зазвичай для стабілізації течії і релаксації внутрішніх напружень в розплаві складає 10–30 значень товщини труби. Для зменшення маси головок для труб великого типорозміру дорн можуть виконувати порожнистим з установкою всередині нього нагрівників. Дорн кріпиться на дорнотримачах у вигляді стійок («павукові ноги»), решіток або кілець (рис. 5.3). Довжина стійок становить 30–80 мм, а їхня ширина – 9–12 мм. Розтинаючи потік розплаву, дорнотримачі створюють проблему наявності ліній зварювання потоків, які особливо ослаблюють виріб, якщо полімер характеризується поганою зварюваністю.

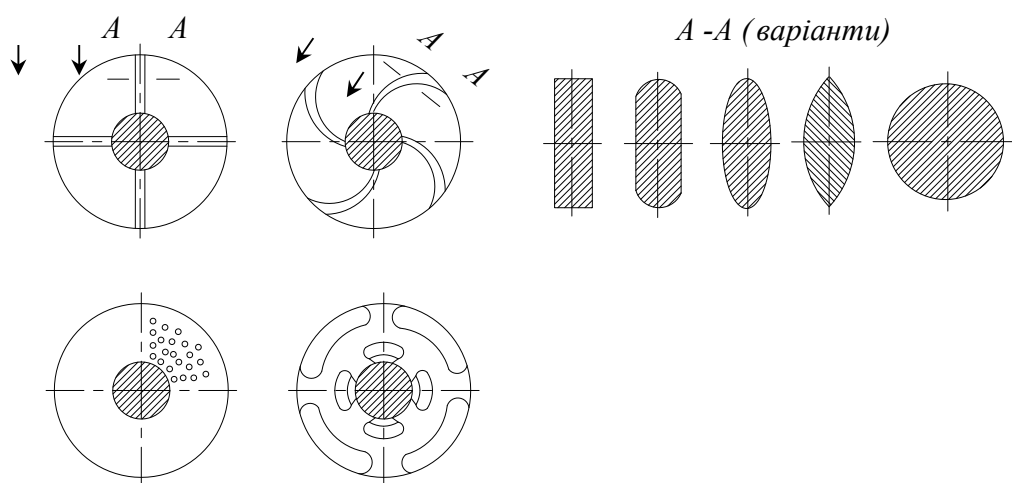


Рис. 5.3. Види дорнотримачів

Існує спосіб уникнути зниження міцності труби через «спайки» – необхідно розподілити їх не перпендикулярно стінці труби, а по спіралі (рис. 5.4). Такі труби виходять майже витими з тонких шарів полімеру, що також підвищує їхні механічні властивості, оскільки неоднорідність розплаву зосереджується не вузьким подовжнім місцем на трубі по всій товщині стінки,

а розподіляється вузьким шаром у товщині стінки по всьому її перерізу (рис. 5.4,б).

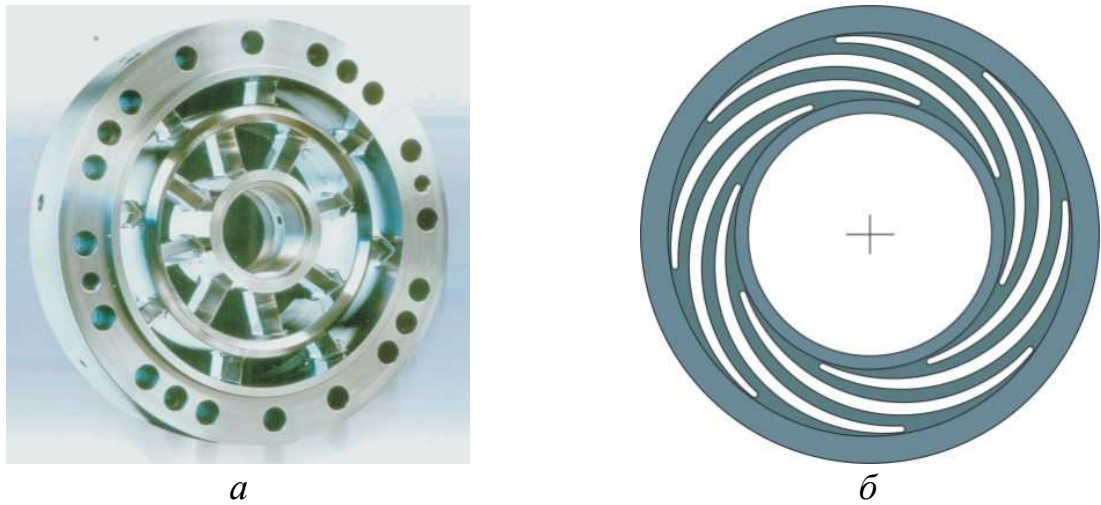


Рис. 5.4. Спіральний дорнотримач (а) і розподіл розплаву (б)

Найменший розсікальний ефект створюють дорнотримачі у вигляді решітки з діаметром отворів 1,5–2,5 мм, проте через малий поперечний переріз вони створюють високий опір, тому для збільшення цього перерізу їх доцільно виготовляти у вигляді стакана з перфорованими стінками (рис. 5.5). Розплав для проходження поперечних решіток має змінити подовжній напрям течії на поперечний. За решіткою він потрапляє в подовжній кільцевий канал, де знову змінює напрям вже на осьовий. Інтенсивне перемішування струменів, спричинених розділенням потоку отворами, при їх подвійному повороті також сприяє надійному з'єднанню. Оскільки в головці під час течії в'язкої рідини створюється високий тиск, то злиття струменів один з одним з утворенням однорідного потоку відбувається швидко та ефективно.

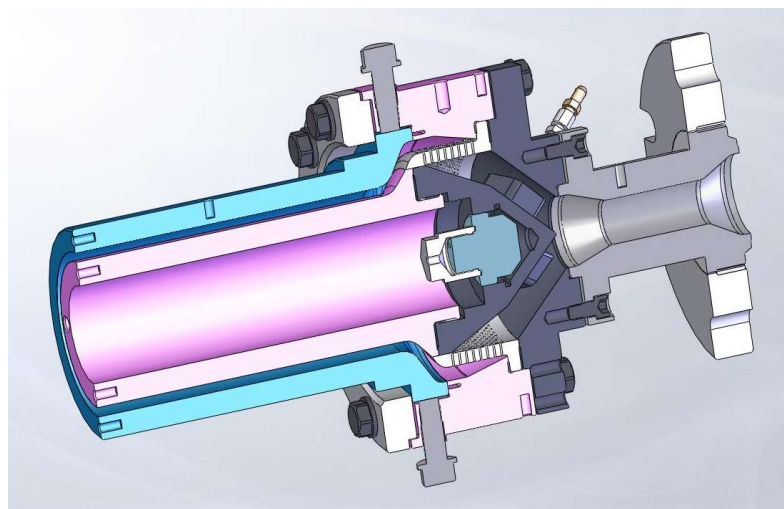


Рис. 5.5. Трубна головка з поперечними решітками

Для розмивання ліній зварювання застосовують такі прийоми:

- 1) зниження площі поперечного перерізу за дорнотримачами в 3–5 разів;
- 2) застосування локальних звужень поперечного перерізу;
- 3) обертання дорну або матриці;
- 4) виконання нарізки на ділянці дорну багатозахідної спіральної нарізки, що звужується, з глибиною, що зменшується до виходу (рис. 5.6).

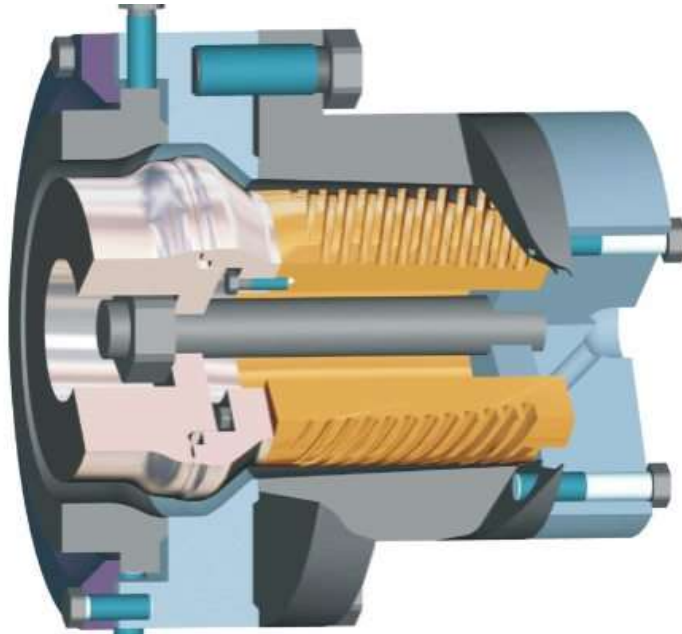


Рис. 5.6. Трубна головка із спіральним розподільником

Спіральні розподільники потоків і дорнотримачі з поперечними решітками ефективно використовуються і в головках для виготовлення багатошарових труб (рис. 5.7). Основний потік розплаву покривається ззовні і зсередини шаром іншого матеріалу. Такого типу головки на тепер широко використовуються для виготовлення тришарових труб, у яких внутрішній і зовнішній шари виконують з основного матеріалу (наприклад, ПЕНТ, непластифікований ПВХ), а внутрішній шар може бути виконано із спіненого або вторинного матеріалу. Використання тришарових труб дає змогу полегшувати труби, поліпшувати їхні теплоізоляційні властивості або знижувати вартість за рахунок використання вторинних ресурсів

Головки для виготовлення одношарових гофрованих труб мають звичайну конструкцію для трубних головок невеликого й середнього розміру. Їхня відмінність полягає в тому, що вони мають довгі мундштук і дорн, які потрібні для підведення трубчастої заготовки майже впритул до півформ тракового пристрою, які стуляються між собою. Через таку конструкцію вони не можуть обігріватися постійно, оскільки нагрівник заважає стуленню півформ. Обігрівання здійснюється стартовим нагрівником, який виконується у вигляді знімної втулки з нагрівальним елементом всередині. Перед пуском

дорн і мундштук прогрівують стартовим нагрівником, який потім знімають і продовжують процес екструзії вже без зовнішнього обігріву.

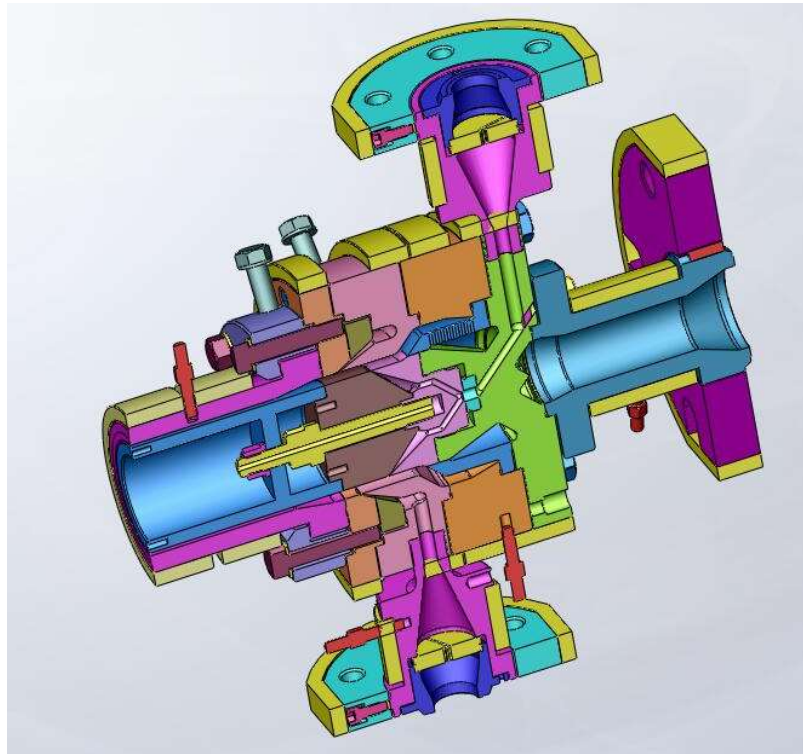


Рис. 5.7. Співекструзійна трубна головка

Прямотечійними кільцевими часто виконують також гранулювальні головки (рис. 5.8).

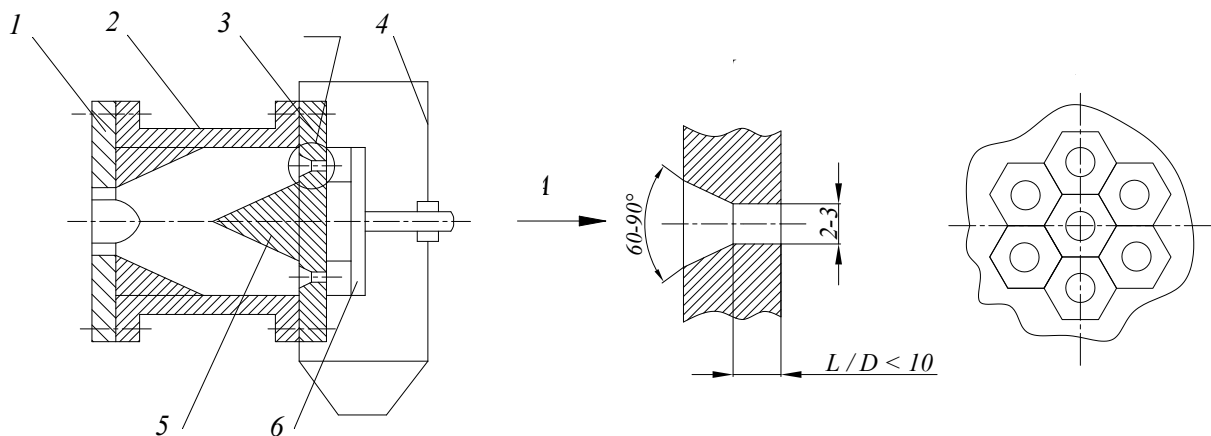


Рис. 5.8. Кільцева гранулювальна головка: 1 – фланець екструдера; 2 – корпус головки; 3 – фільтерна плита; 4 – розсікач; 5 – обертовий ніж; 6 – приймальна камера з повітряним або водяним охолодженням

Великотоннажне виробництво більшості видів гранульованих

полімерних матеріалів здійснюється гранулюванням на решітці. Екструзійна головка для такого процесу представляє собою масивний корпус, на виході з якого встановлено перфоровану решітку з великою кількістю отворів, розташованих у декілька рядів зазвичай по концентричних колах. Агрегат складається з екструзійної головки і приводу обертання ножів, розташованих у приймальній камері.

Підведення розплаву до формуючих отворів здійснюється крізь канал, утворений корпусом головки й конічним розсікачем. З боку входу в решітку отвори роззенковують до зіткнення їх між собою для усунення застійних зон. Діаметр отворів решітки становить 2–4 мм, а її товщина – 20–50 мм (залежно від призначення головки за перероблюваним матеріалом і продуктивністю екструдера). Для одержання зекстурованих із головки стренг (прутків) однакового діаметра зовнішні отвори виконують дещо більшими, ніж ті, що примикають до розсікача, що вирівнює опір течії по висоті решітки. Можуть бути також і інші шляхи вирівнювання розмірів стренг.

З боку виходу підводиться обертовий ніж, який з великою швидкістю зрізує стренги. Залежно від типу гранульованого матеріалу і швидкості обертання ножа, стренги, що зрізуються, мають вид бочонків, чечевиці або кульок. Інколи отвори в решітці виконують квадратними або прямокутними. Такі гранули займають менший об'єм під час транспортування внаслідок кращої упаковки і сприяють кращому захопленню витками шнека в зоні завантаження. Але такі головки складніші й дорожчі у виготовленні.

Торцева поверхня решітки піддається зношуванню обертовим ножем, тому решітки повинні мати підвищену твердість і бути виконані з конструкційної й корозійностійкої сталі. Ніж має певний кут заточування різального пругу.

Зазор між решіткою й поверхнею ножа регулюється залежно від в'язкості розплаву і вимог до гранулометричного складу матеріалу. Для низьков'язких матеріалів (поліолефінів) цей зазор менше ніж для високов'язких (композиції НПВХ).

Гранулювання проводять за мінімально можливої температури, що значною мірою зменшує проблеми процесу, пов'язані з «розмазуванням» розплаву по решітці. Збільшення зазору між ножем і решіткою, затуплення ножа, зниження швидкості його обертання, підвищення температури в зоні контакту – це основні причини, через які розплав розмазується по решітці.

Приймання й попереднє охолодження гранул здійснюється в камері, що примикає до гранулювальної решітки, в току води (для низьков'язких матеріалів) або під вакуумом (для ПВХ та інших високов'язких матеріалів).

Вакуумування камери перешкоджає окисненню матеріалу на виході з головки і сприяє швидкому видаленню гранул у зону охолодження.

На великих агрегатах для гранулювання поліолефінів досягають

продуктивності до 25 т/год, продуктивність же агрегатів для гранулювання ПВХ досягає 3–6 т/год.

Головки для стренгової грануляції частіше виконують у прямокутному корпусі з одним або двома рядами отворів по ширині. Оскільки між рядами отворів відстань невелика, то розділяти ряди отворів розсікачем немає потреби. Для широких головок передбачається зниження опору течії по краях шляхом збільшення діаметра периферійних отворів, поглиблення каналів у бокових зонах і т.д., що дає змогу зменшити різницю в швидкостях течії в центральній області і по периферії.

Отвори в рядах розташовують у шаховому порядку для запобігання зварюванню стренг на виході їх з головки. Стренгову грануляцію проводять за вищих температур розплаву порівняно з грануляцією на решітці, тому таке розділення отворів у рядах необхідне. Діаметр отворів у головках для стренгової грануляції можна брати більшим, тому що розплав піддається витяжці, за якої поперечний переріз стренг зменшується. Залежно від реологічних властивостей гранульованого матеріалу діаметр отворів становить 4–7 мм.

Охолодження стренг проводиться у відкритій водяній ванні, перед подачею до різального пристрою стренги заздалегідь осушують стисненим повітрям.

Різання прутків на гранули циліндричної форми здійснюється фрезою, що обертається з регульованою швидкістю. Стабільність роботи різального пристрою залежить від відмінності в розмірах прутків по ширині щілини. Значна відмінність може спричиняти застрягання товстих або прослизання тонких прутків між різальними ножами, що потребує повторної наладки процесу.

Продуктивність стренгової грануляції значно нижча від продуктивності грануляції на решітці. Але такий спосіб простіший і не потребує складного спеціального обладнання.

5.5.2. Профільні головки

Найбільш складними для розрахунку є профільні головки, оскільки канали в них можуть бути дуже різними за розміром, а отже відрізнятимуться в'язкість і температура розплаву через різну швидкість зсуву та умов теплообміну. Основні труднощі процесу – вирівнювання об'ємної швидкості різних потоків розплаву в головці по всьому поперечному перерізу профілю. Навіть за наявності сучасної обчислювальної техніки і спеціального програмного забезпечення, наприклад, в Німеччині у середині 1990-х рр. для створення нової профільної головки в середньому було потрібно сімнадцять доведень «в залізі». Для кінцевого вирівнювання швидкостей застосовують спеціальні насадки: дросельні або перфоровані шайби та ін.

Прямотечійні головки використовують для виготовлення трубних,

порожнистих, камерних і суцільних профілів. Трубоподібні профілі отримують на звичайних трубних головках з використанням такого самого формуючого інструменту, що і для виготовлення звичайних труб. Формування профілю потрібної геометрії здійснюється у вакуумному калібрувальному пристрої методом пластичної деформації. Калібратор може бути довгомірним або представляти собою втулку, установлену на вході у вакуумну ванну. Трубчаста заготовка поступово перетворюється на виріб потрібної форми на ділянці між головкою й калібратором.

Метод пластичної деформації (postforming) часто застосовують для формування деяких видів профілів із заготовок простого поперечного перерізу. Наприклад, відомий виріб «сайдинг» отримують з використанням щільної головки завширшки 250–400 мм і двох послідовно установлених калібраторів для попереднього та остаточного формування сайдинг-панелі або комплектувального профілю до панелі. Текстурування поверхні панелі здійснюють відразу після головки в тиснільних валках, робоча поверхня яких має різноманітний малюнок.

Головки для виготовлення порожнистих і камерних профілів схожі з головками для виробництва труб. Відрізняються вони складнішою конструкцією дорну, іноді дорнотримача, загальною компоновкою деталей, а також зазвичай відсутністю регулювання зазорів між мундштуком (фільєрою) і дорном. Головки блендової конструкції мають циліндричний адаптер і корпус головки, до якого приєднуються прямокутні проміжні деталі й формуюча частина (фільєра). Переважно всі деталі виконують нерознімними, що полегшує і здешевлює їх виготовлення.

До камерних профілів належать також «віконні» профілі, з яких складають пластмасові вікна та двері. Головки для їх виготовлення також виконують бленовими. Подачу повітря в порожнині профілю здійснюють крізь отвори в спицях дорнотримача й дорну. Зазвичай подача повітря у внутрішню порожнину профілю передбачається завжди, але іноді під час екструзії деяких високов'язких розплавів (наприклад, непластифікованого ПВХ) отвори в дорні не виконують, якщо немає небезпеки зварювання близько розташованих стінок профілю між собою.

Товщина стінок профілю має бути по можливості однаковою й відносно невеликою. Основним завданням під час проектування головок є забезпечення рівності швидкостей у всіх поперечних перерізах профілю. За різної товщини профілю доводиться регулювати довжину каналів на різних ділянках. Після охолодження такого профілю можуть утворитися залишкові напруження, що виявляється у викривленні або розтріскуванні виробу.

Основні складнощі виникають під час проектування й виготовлення перехідних каналів від круглого або кільцевого перерізу на вході до кінцевого профілю (рис. 5.9 і 5.10). Часто їх утворюють декілька деталей, тобто матриця

виконується складеною. При цьому перехід має бути плавним, без різких змін поперечного перерізу й застійних зон, технологічним у виготовленні, експлуатації і складанні-розбиранні. Лінії стику деталей матриці не повинні потрапляти на лицьові поверхні виробу, а краще за все розташовуватися на кутах. Кути по можливості не мають бути гострими, а мати мінімальний радіус 0,2–0,4 мм. Вигини профілю під гострим кутом і майже замкнуті контури робити в головці небажано – це можна довести в калібрувальному пристрої.

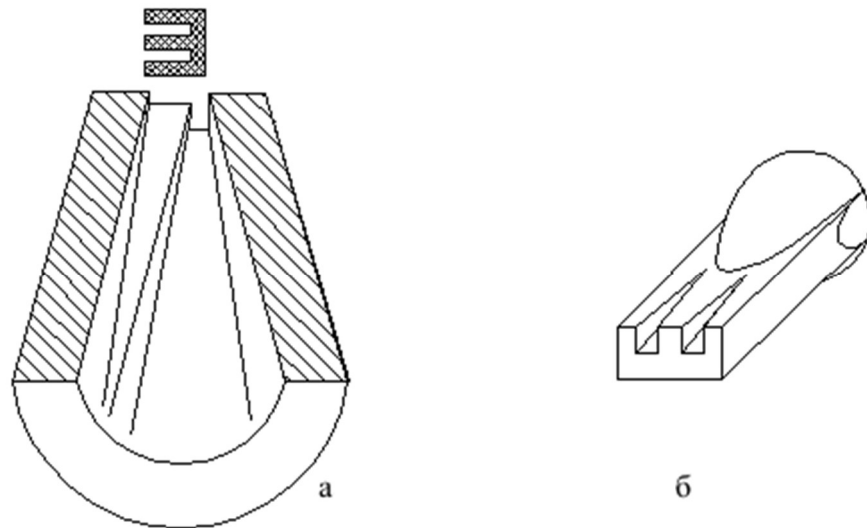


Рис. 5.9. Оснастка для формування Ш-подібного профілю: *а* – геометрія мундштука; *б* – зліпок перехідного і формуючого каналів в блендовій конструкції

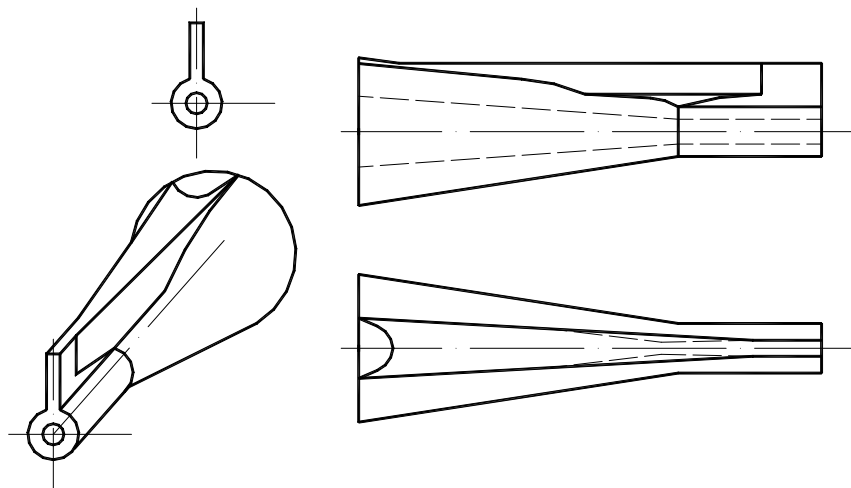


Рис. 5.10. Зліпок і перехідний і формуючий канал для екструзії профілю «рояльна петля»

5.6. Плоскощілинні головки

Плоскощілинні головки призначені для одержання листів, плівок і нанесення покриттів. Вони можуть бути прямотечійними й кутовими. Основне завдання таких головок – перетворення потоку розплаву з круглого перерізу на вході в широку плоску щілину на виході за умови рівності вихідних швидкостей по всій ширині. Для дотримання останньої умови має бути забезпечена рівність опорів по всіх лініях току розплаву. При цьому довжина ліній току має бути мінімальною для зменшення маси головки й часу перебування в ній.

Оскільки довжина ліній току поблизу подовжньої осі і на периферії різна, необхідно створити більший опір потоку поблизу осі. Цього можна досягти, змінюючи довжини каналів або їх висоту, а також комбінуючи ці способи. Альтернативний шлях – збільшити температуру розплаву від осі до країв.

Існують дві основні конфігурації плоскощілинних головок (рис. 5.11): трикутні й колекторні [130, 133].

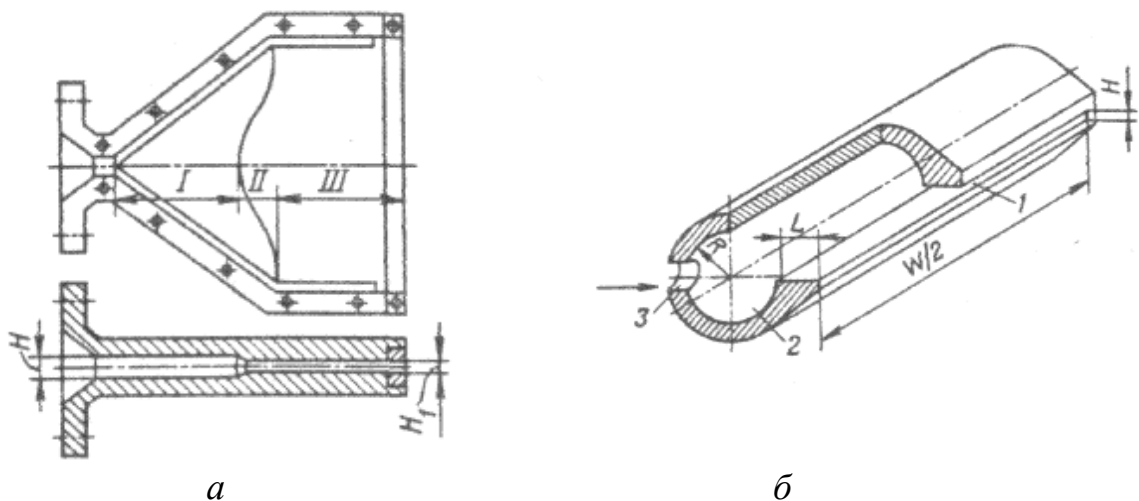


Рис. 5.11. Схеми плоскощілинних головок: а – трикутна, б – колекторна

У трикутних головках розподільний канал має вид щілини більшої висоти, ніж вихідний, з трикутною в плані формою (риб'ячий хвіст) [78, 134, 135].

Вхідну зону I виконують у вигляді каналу, що розширюється в щілину від вхідного отвору, переходить у зону II вирівнювання гідравлічного опору по ширині формуючого каналу й потім у зону формуючого каналу III постійної заданої ширини й висоти. Вирівнювання потоку досягається за рахунок зміни співвідношення довжин розподільного й вихідного каналів на ділянці II (рис. 5.11, а) або установкою на цій ділянці елемента опору типу «острівця» з висотою, що зменшується від осі до країв (рис. 5.12):

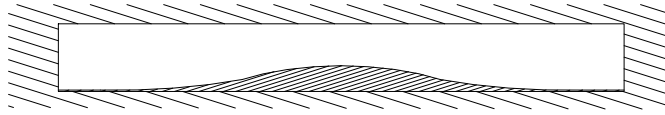


Рис. 5.12. Переріз перехідної ділянки з елементом опору типу „острівць”

Основний недолік трикутних головок полягає в тому, що геометрія зон I і II обумовлює велику площу каналів в плані. Під впливом тиску в них верхня й нижня стінки головки деформуються, що спричинює зміну висоти формуючого каналу і, відповідно, товщини виробу. Для запобігання цього складність конструкції і матеріалоемність головки значно збільшується. Ще одним недоліком є великий час перебування розплаву в головці, що обмежує можливості переробки нетермостабільних матеріалів.

У колекторних головках розплав від центрального отвору підводиться до щілини крізь трубу-колектор з бічним виходом і закритими торцями [136] (рис. 5.13). Натепер це найбільш поширений тип головок. Поперечний переріз колектора може бути різним, найчастіше круглим, прямокутним, трикутним, краплеподібним:

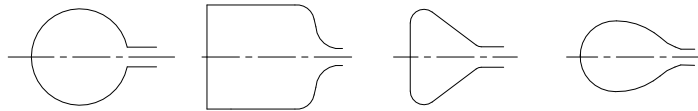


Рис. 5.13. Варіанти перерізів колектора

Для забезпечення рівності опорів по ширині на будь-якій координаті z має бути виконана умова постійної суми протитисків колектора та щілини

$$P_z^{\text{кол}} + P_z^{\text{щ}} = \text{const.}$$

У колекторі відбувається одночасно два види рухів: вздовж його осі до краю, і з колектора в щілину (рис. 5.14).

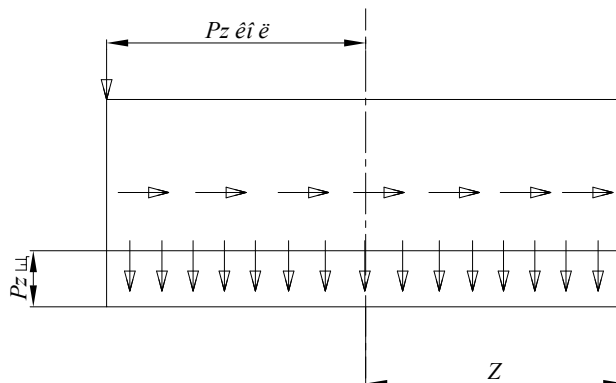


Рис. 5.14. Схема течії розплаву в колекторі і щілині

З одного боку, в кожному перерізі колектора витрата становить

$$Q_z^{\text{кол}} = K_{\text{кол}} \frac{dp}{dz},$$

де $K_{\text{кол}}$ – коефіцієнт геометричної форми колектора.

Інтегрувати це рівняння по всій ширині не можна, оскільки похідна dp/dz безперервно змінюється.

З іншого боку, з умови рівності витрати крізь щілину по ширині, витрата крізь ділянку щілини від краю до координати z пропорційна цій точці перерізу

$$Q_z^{\text{щ}} = \frac{Q}{W} z,$$

причому він рівний витраті крізь колектор у цій точці перетину.

Виходячи з припущення, що залежність швидкості зсуву від дотичного напруження в розплаві підлягають степеневому закону в формі

$$\dot{\gamma} = m\tau^n,$$

рівняння витрати в щілинному каналі

$$Q = \frac{m}{n+2} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)^n \frac{fH^n}{2^{n+1}},$$

де f – площа поперечного перерізу каналу; H – висота щілини; L – довжина щілини; m та n – реологічні константи.

Об'ємна витрата для колектора, наприклад, круглого перерізу радіусом R

$$Q = \frac{\pi m R^{n+3}}{(n+3)(2z)^n} \Delta P^n.$$

Після цього, прирівнявши між собою витрати в двох останніх формулах, отримаємо рівняння, яке можна розв'язати для кожного z відносно довжини щілини L , отримавши залежність $L(z)$.

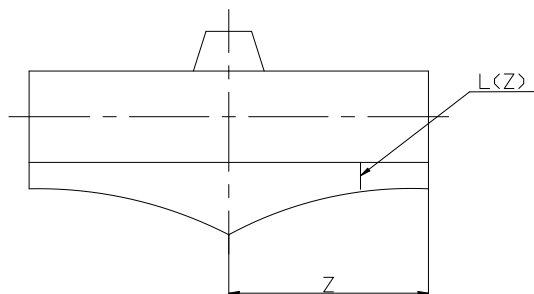


Рис. 5.15. Схема розрахункової конфігурації каналу плоскощілинної головки

Проте в такий спосіб головки не виготовляють, оскільки, по-перше,

внаслідок зниження витрати крізь колектор поблизу краю утворюється застійна зона, а по-друге, через різні точки виходу розплаву з щілини відбуватиметься викривлення виробу, оскільки застигання розплаву буде неодноразовим. Тому крайка щілини має бути плоскою.

Для усунення першого недоліку радіус колектора має зменшуватися від центру до краю за певним законом, наприклад з умови постійної вздовж колектора швидкості течії або швидкості зсуву

$$U_z^{\text{кол}} = \text{const} \quad \text{або} \quad \dot{\gamma}_z^{\text{кол}} = \text{const}.$$

В останньому випадку закон зміни радіуса колектора матиме вигляд

$$R(z)^{\text{кол}} = R_o \left(\frac{W - z}{W} \right)^{1/3},$$

де R_o – радіус колектора на вході; при цьому радіус на виході має бути більшим, ніж 0,75 висоти щілини.

Для усунення другого недоліку колектор розташовують під кутом до осі, зберігаючи залежність L від z . У результаті отримуємо головку конфігурації, подібної до плечиків для одягу (рис. 5.16).

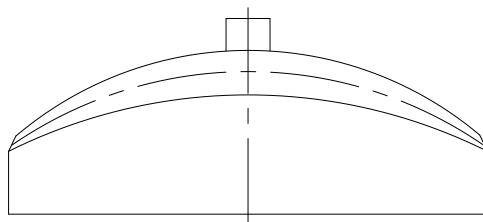


Рис. 5.16. Схема конфігурації каналу головки типу «вішалка»

Для спрощення виготовлення колектора його форму часто випрямляють (рис. 5.17).

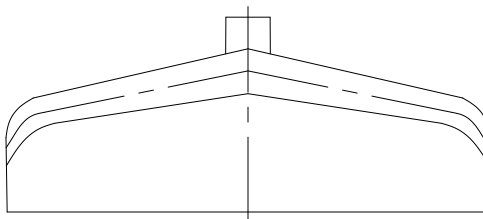


Рис. 5.17. Схема спрощеної конфігурації каналу головки

Неточності в рівнотовщинності, що виникають при цьому, усувають спеціальними пристроями, зокрема гнучкою планкою (рис. 5.18, а, поз. 6) або набором повзунів (рис. 5.18, б, поз. 9).

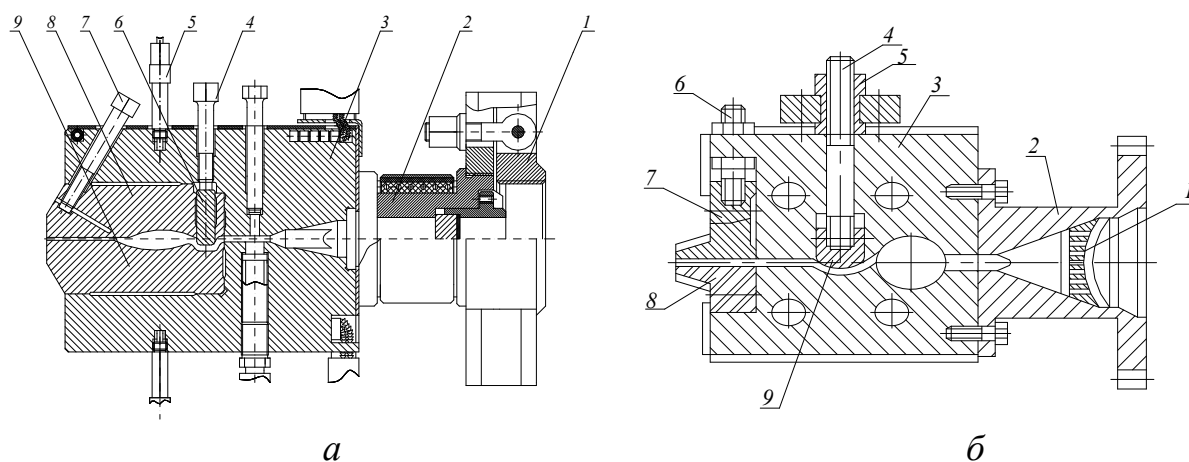


Рис. 5.18. Подовжній розріз плоскощілинної головки: а – для виробництва плівок і тонких листів (1 – фланець, 2 – адаптер (перехідник), 3 – корпус, 4 – натискний болт, 5 – термопара, 6 – перетиска планка, 7 – регулювальний болт, 8 – верхня розрізна губка, 9 – нижня губка); б – для виробництва товстих листів (1 – фільтрувальна решітка, 2 – адаптер, 3 – корпус, 4 – натискний болт, 5 – гайка, 6 – регулювальний болт, 7 – верхня рухома губка, 8 – нижня нерухома губка, 9 – повзун)

Недоліки цих пристроїв полягають у тому, що гнучка планка має невеликий діапазон регулювання, а регулювальні повзуни мають бути майже ідеально підігнані між собою, в іншому разі розплав затікатиме між ними й розкладатиметься, а на зекструдованому листі з'являться сліди від стиків.

Тонке регулювання досягається вигином формуючих губок (рис. 5.18, а, поз. 7, 8). Для виготовлення тонких плівок обходяться останнім, оскільки ступінь вигину губок сумірний з товщиною плівки (рис. 5.19).

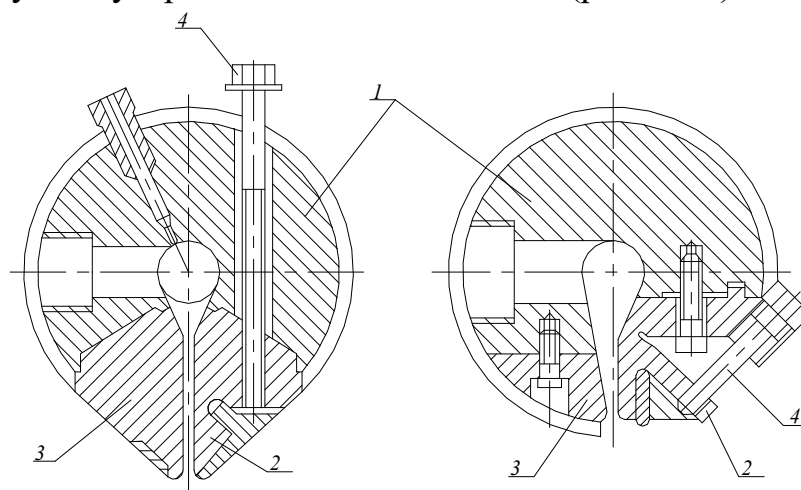


Рис. 5.19. Головки для виробництва тонких плівок: 1 – корпус, 2 – верхня регульована губка, 3 – нерухома губка, 4 – регулювальний болт

Кількість регулювальних болтів у широких щілинних головках вимірюється десятками, тому ручне регулювання товщини плівки або листа, що виходять з головки потребує значних витрат часу й сировини. Натепер вручну

здійснюють лише грубе регулювання для запуску нової продукції, а в процесі виробництва застосовують так звані термоболти, виготовлені із сплаву з великим коефіцієнтом лінійного розширення. Кожен термоболт забезпечений електричним нагрівником і каналом для охолоджувальної рідини. На виході з головки встановлюють пристрій безперервного вимірювання товщини екструдату в декількох точках по його ширині.

У разі відхилення товщини в більшу сторону надходить сигнал на нагрівник відповідного термоболта, внаслідок нагріву останній подовжується, натискаючи на регулювальну планку і звужуючи канал у локальній області. У разі зменшення товщини надходить сигнал на клапан подачі охолоджувальної рідини, і термоболт скорочується, розширюючи при цьому канал і, відповідно, збільшуючи витрату й товщину екструдату на відповідній ділянці.

5.7. Кутові кільцеві головки

У кутових головках здійснюється поворот потоку розплаву зазвичай на 90° . Частіше за все таку конструкцію мають головки для виробництва рукавної плівки, трубних заготовок в агрегатах для роздування порожнистих виробів, а також виготовлення кабелів. Усі ці головки мають кільцевий вихід. Основні проблеми під час конструювання полягають у тому, що при повороті лінії току розплаву відстань, пройдена розплавом, неоднакова, а на виході потрібно отримати однорідність швидкостей.

Поворот можна здійснювати центральною трубою до дорну, але це збільшує габарити головки. Другий метод вирівнювання швидкостей по колу – поворот навколо дорну, який здійснюється так, щоб довжина ліній току або перепад тиску були однаковими в кільцевому напрямку (рис. 5.20). Такі канали є аналогом каналів плоскощільної головки, згорнутих в кільце. Корегування здійснюється регулюванням ексцентриситету матриці відносно дорна.

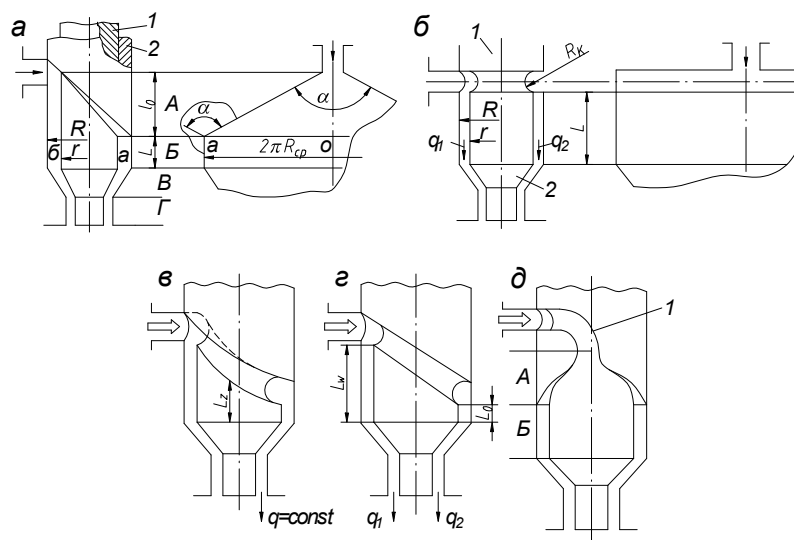


Рис. 5.20. Схеми каналів кутових кільцевих головок

У варіантах конструкції з обтіканням дорну останній закріплюють піноллю з великою площею опори на корпус. Це забезпечує потрібну жорсткість його установки, відсутності дорнотримачів і ліній зварювання (рис. 5.21). Проте виникають труднощі в забезпеченні рівних швидкостей.

Плівкові головки з пінольним дорном (рис. 5.22) натеper зустрічаються рідко. У цьому варіанті для вирівнювання швидкостей передбачено проміжний колектор.

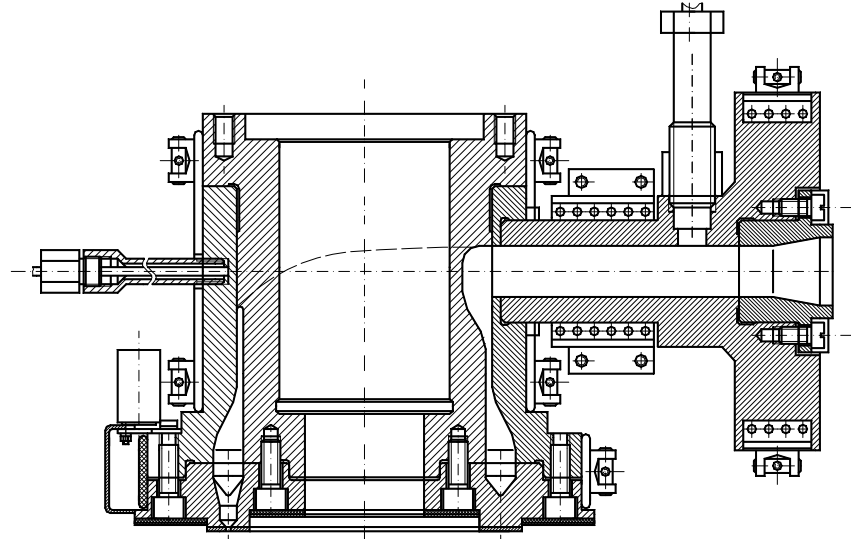


Рис. 5.21. Приклад конструкції кутової гранулювальної головки

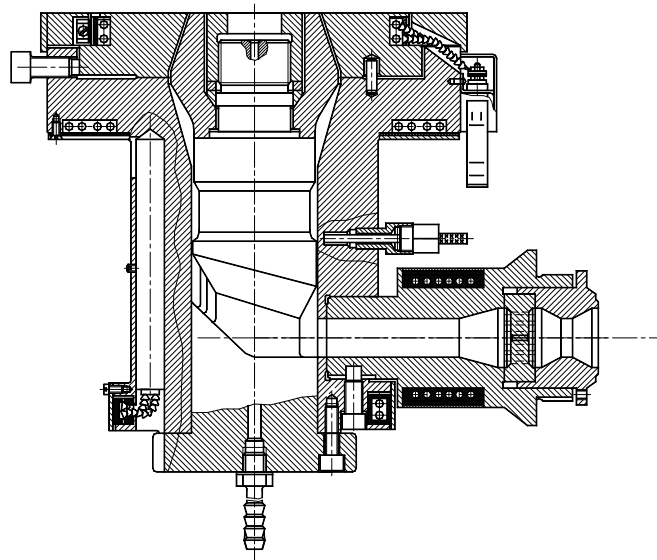


Рис. 5.22. Конструкція плівкової головки з пінольним дорном

Частіше з центральної труби розплав підводять у кільцевий канал крізь радіальні отвори (схема «зірка», рис. 5.23). Для розмивання ліній зварювання застосовуються спіральні канавки на дорні із глибиною, що зменшується, причому кожен отвір виходить в окрему канавку.

У головках із спіральним розподільником потік на вході в головку розділяється на декілька радіальних потоків, які в спіральному розподільнику трансформуються в два основних потоки. Один потік – кільцевий – тече по зовнішній стороні розподільника в кільцевому зазорі, що звужується до виходу, а другий – багатозаходний спіральний потік – у спіральному каналі змінної глибини, що зменшується до виходу. Частина розплаву при цьому закручується. На виході з розподільника струмені спірального й кільцевого потоків зливаються в однорідну за температурою і властивостями масу, без холодних спаїв, і крізь регульований кільцевий зазор об'єднаний потік розплаву виходить з головки.

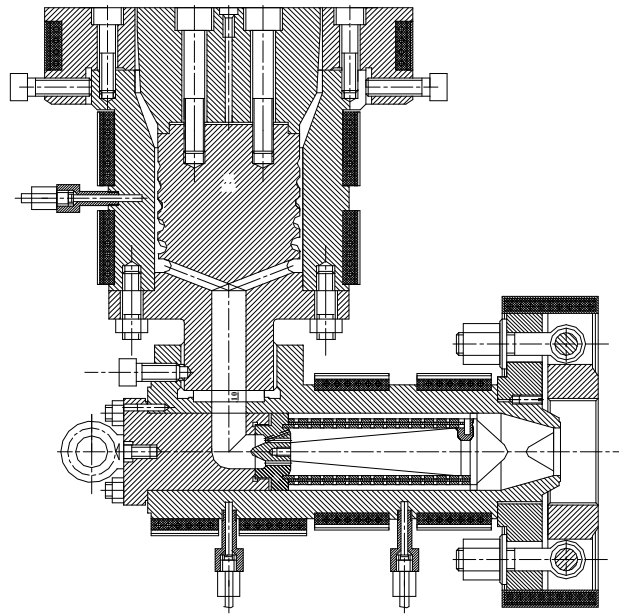


Рис. 5.23. Конструкція плівкової головки із спіральним розподільником

Межі між потоками не існує, витрата кожного залежить від геометричних характеристик каналів і технологічних параметрів течії. Сумарний потік залишається при цьому незмінним, а залежно від форми і розмірів кільцевого й радіальних каналів змінюється співвідношення потоків, сумарний перепад тиску в головці, інтенсивність перемішування і максимальна швидкість екструзії.

Більш радикальним засобом, який також може застосовуватися в поєднанні із спіральним розподільником, є обертання дорну або матриці. Простіше забезпечити привід обертання матриці, але тоді потрібно передбачити струмозйомники для підведення електрики до нагрівників і зняття сигналів з термодатчиків. Компромісним варіантом є головки з реверсивним приводом, що роблять не повний оберт, а зворотно-обертовий рух, наприклад на 270° . У цьому разі електричний струм і сигнали проходять по гнучких кабелях. Недоліком обертових головок є вузли ущільнення між нерухомими та

обертовими елементами.

Кабельні головки призначені для нанесення покриттів на кабельну жилу або багатожильний дріт (рис. 5.24).

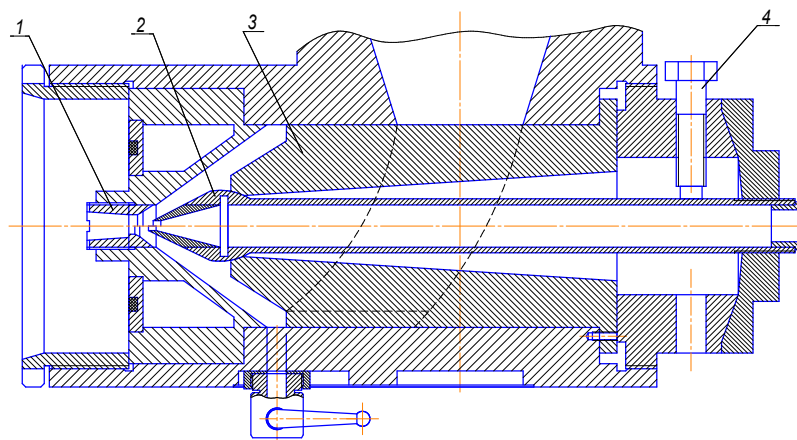


Рис. 5.24. Конструкція кабельної головки: 1 – матриця, 2 – порожнистий дорн, 3 – піноль, 4 – пристрій центрування дорна

На відміну від інших кільцевих головок, внутрішня поверхня кабельної головки утворена рухомим дротом, що створює додатковий винос розплаву. Під час розрахунку це необхідно враховувати, щоб не відбулося розрідження з порушенням суцільності на виході.

Продуктивність виносу складається із звичайною розрахунковою:

$$Q_{\text{вих}} = Q_p + Q_{\text{виносу}};$$

$$Q_{\text{виносу}} = \frac{\pi V_0 d_b^2}{4} \left[\frac{(d_n / d_b)^2 - 1}{2 \ln(d_n / d_b)} - 1 \right],$$

де V_0 – швидкість жили, м/с (зазвичай 0,25–0,4 м/с); d_b , d_n – внутрішній і зовнішній діаметри кабельної оболонки, відповідно, м.

Одним з видів кутових кільцевих головок є головки для роздування трубчастих заготовок в порожнисті вироби (рис. 5.25). Зазвичай їх споряджають пристроями регулювання товщини й рівнотовщинності заготовок.

Під час проектування таких головок потрібно враховувати, що полімерна заготовка на виході з них не піддається ані калібруванню, ані витяжці, за винятком сили власного тяжіння.

Ступінь витончення заготовки в будь-якому перерізі по її висоті пропорційна масі частини заготовки нижче цього перерізу й часу дії цієї маси. У верхній частині заготовки вага максимальна, але час дії дорівнює нулю, а в нижній частині – навпаки. Таким чином, максимальний ступінь витончення трубчастої заготовки має місце в середній її частині, ближче до верху.

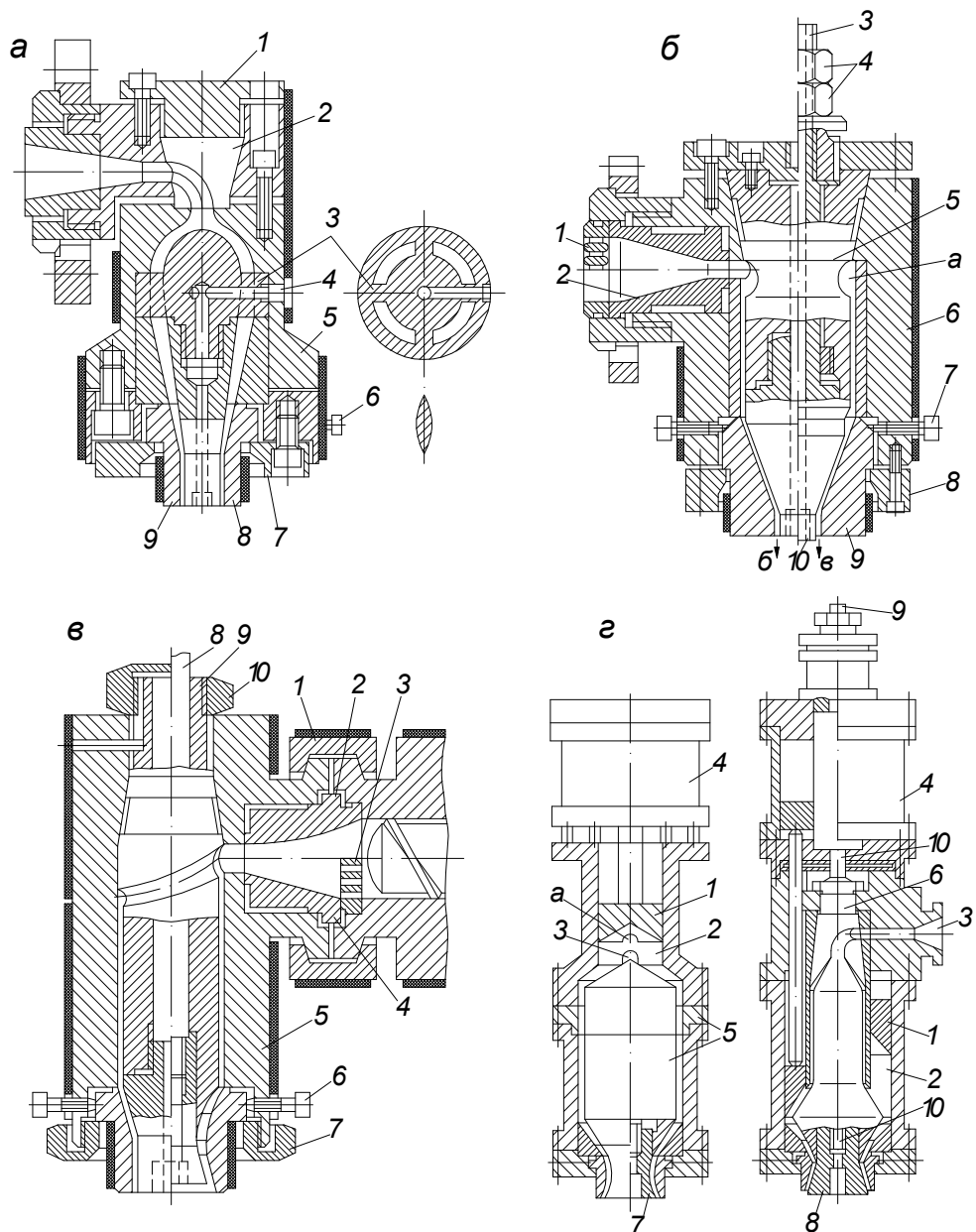


Рис. 5.25. Приклади конструкцій роздувних головок: головка а: 1 – притискна кришка; 2 – пробка; 3 – дорнотримач; 4 – канал для підведення повітря; 5 – корпус; 6 – регулювальні болти; 7 – фланець кріплення мундштука; 8 – дорн; 9 – мундштук; головка б: 1 – решітка; 2 – перехідник; 3 – шток рухомого дорну; 4 – контргайки; 5 – піноль; 6 – корпус; 7 – регулювальні болти; 8 – фланець кріплення мундштука; 9 – мундштук; 10 – дорн; головка в: 1 – фланець кріплення головки; 2, 4 – варіанти перехідника; 3 – решітка; 5 – корпус; 6 – регулювальні болти; 7 – притискна гайка мундштука; 8 – штанга для регулювання положення дорну; 9 – втулка напрямна; 10 – гайка кріплення пінолі; головки г, д: 1 – видавлювальний поршень; 2 – акумулювальна порожнина; 3 – вхід в головку; 4 – гідро- або пневмоциліндр приводу видавлювального поршня; 5 – дорнотримач із розсікачем потоку; 6 – піноль; 7 – дорн; 8 – дорн, рухомий в осьовому напрямі відносно пінолі; 9 – штанга приводу видавлювального поршня; 10 – шток переміщення дорну в осьовому напрямі

Чим більше час дії (менше лінійна швидкість виходу заготовки), чим більше маса (довжина заготовки й густина розплаву) і менше в'язкість розплаву, тим більше ступінь витончення, що призводить до різнотовщинності виробу, виготовленого з цієї заготовки.

Якщо різнотовщинність виробу стає занадто великою (більше 3–5 %), то потрібно застосовувати головки з акумулятором розплаву. У цьому разі розплав з екструдера подається спочатку в акумулятор, звідки спеціальним поршнем, що має гідро- або пневмопривід, видавлюється крізь формуючий зазор з потрібною швидкістю. Дві конструкції таких головок наведено на рис. 5.25, *г*, *д*. Головка, показана на схемі *г* працює в такий спосіб. При нижньому положенні видавлювального поршня *1* розплав з екструдера крізь отвір *3* подається в акумулювальну порожнину *2*, підіймаючи поршень *1*; при цьому витікання розплаву крізь формуючий зазор майже відсутнє внаслідок того, що тиск, який надається розплаву поршнем, набагато менший за опір формуючого каналу. При наборі в порожнині *2* необхідної дози, в циліндр *4* під тиском подається рідина або повітря, і відбувається екструзія заготовки крізь формуючий зазор. Головка, показана на схемі *д*, відрізняючись наявністю пінолі замість дорнотримача, працює так само, проте, незважаючи на більшу складність, вона надійніша в експлуатації, оскільки позбавлена застійних зон типу зони *а* в головці *г*.

Забезпечення достатньо рівнотовщинної по висоті заготовки ще не визначає однорідності товщини стінки майбутнього виробу. Під час роздування виробу ті частини перетину, що мають великий ступінь роздування, виявляються найбільш тонкими. Для отримання рівнотовщинного виробу заготовка повинна мати зміни товщини по висоті.

Одержання такої заготовки можливе, якщо висота щілини формуючого каналу на виході має можливість змінюватися за визначеною залежністю. Конструктивно зміна висоти формуючого каналу на виході можлива, якщо він не циліндричний, а конічний, як це показано на рис. 5.25, *в*. При осьовому переміщенні рухомого дорну відносно мундштука змінюється відстань між їх конічними вихідними зонами. Переміщення дорну здійснюється за допомогою штанги, пов'язаної з дорном і пропущеної крізь піноль назовні (рис. 5.25, *в*, поз. 8; *д*, поз. 10).

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що існуючі моделі та методики врахування пристінних ефектів під час течії полімерних матеріалів мають не універсальний характер, не повною мірою враховують природу виникнення пристінних ефектів, працюють у вузькому діапазоні геометричних параметрів каналів переробного обладнання та мають обмеження щодо їх застосування під час числового моделювання.

2. Розроблено методику визначення наявності пристінних ефектів у полімерному матеріалі та природи цих ефектів. Залежно від природи пристінних ефектів розроблено методики визначення величини цих ефектів у матеріалі.

3. Проведено експериментальні дослідження, що дозволили отримати дані про природу, характер, величину пристінних ефектів та параметри для завдання граничних умов під час числового моделювання для досліджуваних полімерних матеріалів. Обчислена сумарна відносна похибка експериментальних досліджень становить 1,4 % при довірчому інтервалі 95 %.

4. Математичну модель течії полімерних матеріалів доповнено врахуванням пристінних ефектів залежно від їх природи та матеріалу, що дозволило створити універсальний підхід до визначення параметрів процесу течії під час числового моделювання.

5. Проведено числові дослідження впливу геометричних параметрів каналу на розбіжності перепаду тиску між умовами відсутності швидкості на стінці та врахування пристінних ефектів. Дослідження показали, що під час числового моделювання течії полімерного матеріалу по геометрії формуючої головки нехтування пристінними ефектами призводить до похибки від 11 до 22 % залежно від матеріалу.

6. Встановлено, що пристінні ефекти під час моделювання течії полімерного матеріалу при проектуванні переробного обладнання недоцільно враховувати при довжині каналу менше 20 мм та гідравлічних діаметрах каналів більше 8 мм внаслідок величини їх впливу на процес менше 1 %.

7. Створено регресивні математичні моделі для врахування впливу пристінних ефектів на параметри процесу течії, які дозволяють здійснювати наближений розрахунок перепаду тиску в каналі з урахуванням пристінних ефектів без необхідності проведення числового моделювання.

8. Розроблено конструкції екструзійних головок та черв'яка екструдера з компенсацією пульсацій розплаву, що виникають внаслідок дії пристінних ефектів. Зазначені конструкції забезпечують стабілізацію об'ємної витрати розплаву, а отже й розмірну точність одержуваних виробів.

9. Результати роботи впроваджено в ПАТ «НВП «Більшовик» (м. Київ) при проектуванні та виготовленні переробного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бутко А. Е. Украинский рынок утилизации полимерных отходов и ключевые тенденции его развития / А. Е. Бутко // Young Scientist. — 2015. — № 2. — С. 139—142.
2. Пахаренко В. А. Переработка полимерных композиционных материалов : учеб. пособие [для вузов] / В. А. Пахаренко, Р. А. Яковлева, А. В. Пахаренко. — К. : Воля, 2006. — 552 с.
3. Суберляк О. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / О. В. Суберляк, П. І. Баштанник. — Львів : Растр-7, 2007. — 376 с.
4. Основы технологии переработки пластмасс : учебник для вузов / [С. В. Власов, Э. Л. Калинин, Л. Б. Кандырин и др.] ; под ред. В. Н. Кулезнёва и В. К. Гусева. — М. : Химия, 2004. — 596 с.
5. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р. В. Торнер. — М. : Химия, 1977. — 464 с.
6. Тадмор З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос ; пер. с англ. под ред. Р. В. Торнера. — М. : Химия, 1984. — 632 с.
7. Техника переработки пластмасс / под ред. Н. И. Басова и В. М. Броя. — М. : Химия, 1985. — 528 с.
8. Басов Н. И. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов : учеб. для вузов / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. А. Любартович. — М. : Химия, 1986. — 488 с.
9. Торнер Р. В. Оборудование заводов по переработке пластмасс : учеб. пособие [для студентов вузов] / Р. В. Торнер, М. С. Акутин. — М. : Химия, 1986. — 400 с.
10. Раувендааль К. Экструзия полимеров / К. Раувендааль ; пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. — СПб. : Профессия, 2006. — 768 с.
11. Володин В. П. Экструзия профильных изделий из термопластов / В. П. Володин. — СПб. : Профессия, 2005. — 480 с.
12. Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості : термінол. слов. / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. — К. : ІВЦ «Видавництво „Політехніка”», 2005. — 179 с.
13. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії / Л. Б. Радченко. — К. : ІЗМН, 1999. — 220 с.
14. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. — М. : Химия, КолосС, 2005. — 568 с. — (Учебники и учебные пособия для студ. высш. уч. зав.).
15. Жданов Ю. А. Исследование течения расплавов полимеров в каналах головок червячных машин : автореф. дис. на соискание учен. степ. канд. техн.

Наук ; спец. 176 "Машины и оборудование химических производств" / Ю. А. Жданов — К., 1969. — 24 с.

16. Пристинні ефекти в процесах переробки полімерних матеріалів / В. І. Сівецький, О. С. Сахаров, О. Л. Сокольський, Д. Д. Рябінін. — К. : НТУУ КПІ, 2009. — 140 с.

17. Stokes Y. M. On generalized penalty approaches for slip, free surface and related boundary conditions in viscous flow simulation / Y. M. Stokes, G. F. Carey // International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. — 2010. — N 21. — P. 668—702.

18. Potente H. Description of the pressure through input behavior of a single-screw plasticating unit in consideration of wall slippage effects for non-newtonian material and 1-D flow / H. Potente, K. Timmermann, M. Kurte-Jardin // International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society. — 2006. — N 21. — P. 272—281.

19. Ramamurthy A. Wall slip in viscous fluids and influence of materials of construction / A. Ramamurthy // Journal of Rheology. — 1986. — N 30. — P. 337—350.

20. Polymer Processing, Principles and Modeling / J. Agassant, P. Avenas, J. Sergent, P. J. Carreau. — Munich : Hanser, 1991. — 204 p.

21. Dealy J. Melt Rheology and its Role in Plastics Processing: Theory and Applications / J. Dealy, K. Wissbrun. — New York : Van Nostrand Reinhold, 1990. — 680 p.

22. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла Мантия (ред.) ; пер. с англ. под ред. Г. Е. Зайкова. — СПб. : Профессия, 2007. — 400 с.

23. Ferrás L. L. Theoretical and Numerical Studies of Slip Flows / L. L. Ferrás. — Minho : Universidade do Minho, 2012. — 308 p.

24. Denn M. M. Extrusion instabilities and wall slip / M. M. Denn // Fluid Mechanics. — 2001. — N 33. — P. 265—287.

25. Archer L. Wall slip: measurement and modeling issues. Polymer Processing Instabilities / L. Archer. — New York: Marcel Dekker, 2005. — 73 p.

26. Gevgilili H. Step strain flow: Wall slip effects and other error sources / H. Gevgilili, D. Kalyon // Journal of Rheology. — 2001. — N 45. — P. 467—475.

27. Phan-Thien N. Influence of wall slip on extrudate swell: a boundary element investigation / N. Phan-Thien // Journal of non-newtonian fluid mechanics. — 1988. — N 26. — P. 327—340.

28. Black W. B. Wall-slip and polymer-melt flow instability / W. B. Black, M. D. Graham // Physical Review Letters. — 1996. — N 77. — P. 956—959.

29. Georgiou G. C. On the stability of the shear flow of a viscoelastic fluid with slip along the fixed wall / G. C. Georgiou // Rheologica Acta. — 1996. — N 35. — P. 39—47.

30. Black W. B. Effect of wall slip on the stability of viscoelastic plane shear flow / W. B. Black, M. D. Graham // *Physics of Fluids*. — 1999. — N 11. — P. 1749—1756.
31. Morrison F. A. *Understanding Rheology* / F. A. Morrison. — Oxford : Oxford University Press, 2001. — 560 p.
32. Sunarso A. Numerical analysis of wall slip effects on flow of Newtonian and Non-Newtonian fluids in macro and micro contraction Channels / A. Sunarso, T. Yamamoto, N. Mori // *Journal of Fluids Engineering*. — 2007. — N 129. — P. 23—31.
33. Ferrás L. L. Implementation of slip boundary conditions in the finite volume method: new techniques / L. L. Ferrás, J. M. Nóbrega, F. T. Pinho // *International journal for numerical methods in fluids*. — 2013. — N 72. — P. 724—747.
34. Implementation of a Slip Boundary Condition in a Finite Volume Code Aimed to Predict Fluid Flows / L. L. Ferrás, J. M. Nóbrega, F. T. Pinho, O. S. Carneiro // *Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica*. — 2008. — N 8. — P. 1—10.
35. Скачков В. В. Моделирование и оптимизация экструзии полимеров / В. В. Скачков, Р. В. Торнер, Ю. В. Стунгур, С. В. Реутов — Л. : Химия, 1984. — 152 с.
36. Жданов Ю. А. Расчет и профилирование каналов формующих головок с круглым цилиндрическим коллектором / Ю. А. Жданов, П. К. Допира, Л. А. Иванова // *Сб. «Химическое машиностроение»*, вып. 22. — К. : Техніка. — 1975. — С. 23-31.
37. Piau J. M. Measurement and modelling of friction in polymer melts during macroscopic slip at the wall / J. M. Piau, N. E. Kissi // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 1994. — N 54. — P. 121—142.
38. Sunarso A. Numerical simulation of polymeric flow in contraction channels: wall slip and channel size dependent effects / A. Sunarso, T. Yamamoto, N. Mori // *Flow dynamics*. — 2006. — N 832. — P. 341—344.
39. Милдман С. Течение полимеров / С. Милдман; пер. с англ. Ю. Н. Панова ; под ред. А. Я. Малкина. — М. : Мир, 1971. — 264 с.
40. Яхно О. М. Гідравліка неньютонівських рідин : навч. посіб. / О. М. Яхно, В. І. Желяк. — К. : Вища шк., 1995. — 199 с.
41. Ferrás L. L. Analytical solutions for Newtonian and inelastic non-Newtonian flows with wall slip / L. L. Ferrás, J. M. Nóbrega, F. T. Pinho // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 2012. — N 175. — P. 76—88.
42. Wall slip and shear stresses of polymer melts at high shear rates without pressure and viscous heating effects / K. Awati, Y. Park, E. Weisser, M. Mackay // *Journal of non-newtonian fluid mechanics*. — 2000. — N 89. — P. 117—131.

43. Craig V. Shear-dependent boundary slip in an aqueous newtonian liquid / V. Craig, C. Neto, D. Williams // *Physical review letters*. — 2001. — N 87. — P. 545—564.
44. Brochard F. Shear-dependent slippage at a polymer/ solid interface / F. Brochard, P. De Gennes // *Langmuir*. — 1992. — N 8. — P. 3033—3037.
45. Migler K. Slip transition of a polymer melt under shear stress / K. Migler, H. Hervet, L. Leger // *Physical review letters*. — 1993. — N 70. — P. 287—290.
46. Navier C. L. Memoire sur les lois du mouvement des fluids / C. L. Navier // *Mem. Acad. Roy. Sci. Inst. Fr.* — 1827. — N 6. — P. 389—440.
47. Le Roux C. Steady solutions of the Navier—Stokes equations with threshold slip boundary conditions / C. Le Roux, A. Tani // *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. — 2007. — N 30. — P. 595—624.
48. Matthews M. T. Newtonian flow with nonlinear Navier boundary condition / M. T. Matthews, J. M. Hill // *Acta Mechanica*. — 2007. — N 191. — P. 195—217.
49. Joshi Y. Planar contraction flow with a slip boundary condition / Y. Joshi, M. Denn // *Journal of non-newtonian fluid mechanics*. — 2003. — N 114. — P. 185—195.
50. Liakos A. Discretization of the navier-stokes equations with slip boundary condition / A. Liakos // *Numerical Methods for Partial Differential Equations*. — 2001. — N 17. — P. 26—42.
51. Verfürth R. Finite element approximation on incompressible navier-stokes equations with slip boundary condition / R. Verfürth // *Numerische Mathematik*. — 1986. — N 50. — P. 697—721.
52. John V. Slip with friction and penetration with resistance boundary conditions for the navier-stokes equations: numerical tests and aspects of the implementation / V. John // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. — 2002. — N 147. — P. 287—300.
53. Hatzikiriakos S. G. Wall Slip of Molten Polymers / S. G. Hatzikiriakos // *Progress in Polymer Science*. — 2012. — N 37. — P. 624—643.
54. Potente H. Global concept for describing and investigation of wall slip effects in the extrusion process / H. Potente, H. Ridder, R. V. Cunha // *Macromolecular Materials and Engineering*. — 2002. — N 11. — P. 836—842.
55. Meijer H. Modeling of extrusion with slip boundary conditions / H. Meijer, C. Verbraak // *Polymer Engineering & Science*. — 1988. — N 28. — P. 758—772.
56. Exact solutions for flows of an Oldroyd 8-constant fluid with nonlinear slip conditions / R. Ellahi, T. Hayat, F. M. Mahomed, A. Zeeshan // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. — 2009. — N 15. — P. 322—330.
57. Schowalter W. R. The behavior of complex fluids at solid boundaries / W. R. Schowalter // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 1988. — N 29. — P. 25—36.

58. Hatzikiriakos S. G. A slip model for linear polymers based on adhesive failure / S. G. Hatzikiriakos // *International Polymer Processing*. — 1993. — N 8. — P. 135—142.

59. Joshi Y. Slipping fluids: a unified transient network model / Y. Joshi, A. Lele, R. Mashelkar // *Journal of non-newtonian fluid mechanics*. — 2000. — N 89. — P. 303—335.

60. Thompson P. A. A general boundary condition for liquid flow at solid surfaces / P. A. Thompson, S. M. Troian // *Nature*. — 1997. — N 389. — P. 360—362.

61. Goldstein S. *Modern Developments in Fluid Dynamics: An Account of Theory and Experiment Relating to Boundary Layers, Turbulent Motion and Wakes* / S. Goldstein. — New York: Dover, 1965. — 702 p.

62. ANSYS Polyflow User's Guide — Canonsburg: ANSYS, Inc., 2013. — 790 p.

63. Hatzikiriakos S. G. A dynamic slip velocity model for molten polymers based on a network kinetic theory / S. G. Hatzikiriakos, N. Kalogerakis // *Rheologica Acta*. — 1994. — N 33. — P. 38—47.

64. Black W. B. *Wall slip and boundary effects in polymer shear flows* / W. B. Black. — Wisconsin: University of Wisconsin — Madison, 2000. — 125 p.

65. Yarin A. L. A model for slip at polymer/solid interfaces / A. L. Yarin, M. D. Graham // *Journal of Rheology*. — 1998. — N 42. — P. 1491—1504.

66. *Dynamics of Polymeric Liquids* / R. B. Bird, C. F. Curtiss, R. C. Armstrong, O. Hassager. — New York: Wiley-Interscience, 1987. — 672 p.

67. Hatzikiriakos, Stability of the annular Poiseuille flow of a Newtonian liquid with slip along the walls / M. Chatzimina, G. Georgiou, K. Housiadas, S. G. Hatzikiriakos // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 2009. — N 159. — P. 1—9.

68. Ansari M. *Rheology and Processing of HDPEs: Effects of Molecular Characteristics* / M. Ansari. — Vancouver: The University of British Columbia, 2012. — 162 p.

69. Hatzikiriakos S. G. Wall slip of molten high density polyethylene. Sliding plate rheometer studies / S. G. Hatzikiriakos, J. M. Dealy // *The Society of Rheology*. — 1991. — N 35. — P. 497—523.

70. Hatzikiriakos S. G. Wall slip of molten high density polyethylenes. Capillary rheometer studies / S. G. Hatzikiriakos, J. M. Dealy // *Journal of rheology*. — 1992. — N 36. — P. 703—730.

71. Chen Y. Effects of surface roughness and the chemical structure of materials of construction on wall slip behavior of linear low density polyethylene in capillary flow / Y. Chen, D. Kalyon, E. Bayramli // *Journal of applied polymer science*. — 1993. — N 50. — P. 1169—1177.

72. Person T. J. The effect of die materials and pressuredependent slip on the extrusion of linear low-density polyethylenes / T. J. Person, M. M. Denn // *Journal of Rheology*. — 1997. — N 41. — P. 249—265.
73. Жданов Ю. А. Пристенные эффекты при течении полиэтилена в цилиндрических каналах / Ю. А. Жданов, В. Ф. Дубовицкий // *Химическое машиностроение*. — 1960. — № 9. — С. 21—27.
74. Козлов Л. Ф. Теоретические исследования пограничного слоя / Л. Ф. Козлов. — К. : Наукова думка, 1982. — 293 с.
75. Жданов Ю. А. Исследование профиля скоростей при течении расплава полимера в цилиндрических каналах / Ю. А. Жданов, В. Ф. Дубовицкий // *Химическое машиностроение*. — 1968. — № 8. — С. 42—47.
76. Development Length in Planar Channel Flows of Newtonian Fluids Under the Influence of Wall Slip / [L. L. Ferras, A. M. Afonso, M. A. Alves et al.] // *Journal of Fluids Engineering*. — 2012. — N 134. — P. 1—5.
77. Hatzikiriakos S. G. Slip effects in tapered dies / S. G. Hatzikiriakos, E. Mitsoulis // *Polymer Engineering and Science*. — 2009. — N 49. — P. 1960—1969.
78. Рябинин Д. Д. К расчету профиля подводящего канала плоскощелевых головок / Д. Д. Рябинин, Ю. Н. Самсоненко, С. Ю. Шевчишен // *Сб. «Химическое машиностроение»*, вып. 25. — К. : Техніка. — 1977. — С. 21-25.
79. Kalika D. Wall slip and extrudate distortion in linear low-density polyethylene / D. Kalika, M. Denn // *Journal of Rheology*. — 1987. — N 91. — P. 815—827.
80. Atwood B. T. Measurements of slip at the wall during flow of high density polyethylene through a rectangular conduit / B. T. Atwood, W. R. Schowalter // *Rheologica Acta*. — 1989. — N 28. — P. 134—146.
81. On the effect of the wall slip boundary conditon / L. L.Ferrás, J. M. Nóbrega, F. T. Pinho, O. S. Carneiro // *Semana da Escola de Engenharia*. — 2011. — N 24. — P. 20—29.
82. Boundary slip in newtonian liquids: a review of experimental studies / [C. Neto, D. Evans, E. Bonaccurso та ін.] // *Reports on Progress in Physics*. — 2005. — N 68. — P. 28—59.
83. Watanabe K. Slip of newtonian fluids at slid boundary / K. Watanabe, H. Mizunuma // *JSME international journal. Series B, fluids and thermal engineering*. — 1998. — N 41. — P. 525—529.
84. Pereira G. Effect of variable slip boundary conditions on flows of pressure driven non-newtonian fluids / G. Pereira // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 2009. — N 157. — P. 197—206.

85. Hydrodynamic slippage inferred from thin film drainage measurements in a solution of nonadsorbing polymer / R.Horn, O. Vinogradova, M. Mackay, N. Phan-Thien // *The Journal of Chemical Physics*. — 2000. — N 112. — P. 64—88.
86. Inn Y. Hydrodynamic slip: Polymer adsorption and desorption at melt/solid interfaces / Y. Inn, S. Wang // *Physical review letters*. — 1996. — N 76. — P. 467—470.
87. Barrat J. Large slip effect at a nonwetting fluid-solid interface / J. Barrat, L. Bocquet // *Physical Review Letters*. — 1999. — N 82. — P. 4671—4674.
88. Estellé P. Squeeze flow of bingham fluids under slip with friction boundary condition / P. Estellé, C. Lanos // *Rheologica Acta*. — 2007. — N 46. — P. 397—404.
89. Kazatchkov I. Relaxation effects of slip in shear flow of linear molten polymers / I. Kazatchkov, S. Hatzikiriakos // *Rheologica Acta*. — 2010. — N 49. — P. 267—274.
90. Жданов Ю. А. Учет пристенных эффектов при расчете круглых и плоскощелевых каналов / Ю. А. Жданов, В. Ф. Дубовицкий, Д. Д. Рябинин // *Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб.* — К. : Техніка, 1960. — Вып. 13. — С. 21—27.
91. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. — М. : Химия, 1977. — 440 с.
92. Малкин А. Я. Реология: концепции, методы, приложения / А. Я. Малкин, А. И. Исаев. — СПб. : Профессия, 2007. — 560 с.
93. Теплофизические и реологические характеристики полимеров: справочник / [А. И. Иванченко, В. А. Пахаренко, В. П. Привалко и др.]. — К. : Наук. думка, 1977. — 244 с.
94. Мікульонок І. О. Полімерні композиційні матеріали. Визначення реологічних властивостей / І. О. Мікульонок // *Хімічна промисловість України*. — 2003. — № 6. — С. 58—61.
95. Яхно О. М. Основы реологии полимеров / О. М. Яхно, В. Ф. Дубовицкий — К. : Вища школа, 1976. — 822 с.
96. Archer L. A. Direct measurements of slip in sheared polymer solutions / L. A. Archer, R. G. Larson, Y. L. Chen // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1995. — N 301. — P. 133—151.
97. Рабек Я. Экспериментальные методы в химии полимеров / Я. Рабек. — М. : Мир, 1983. — 384 с.
98. Івіцький І. І. Аналіз математичних моделей течії полімерних матеріалів з урахуванням пристінних ефектів / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок // *Зб. доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки»*. К. : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 41—43.

99. Івіцький І. І. Аналіз методик визначення величини пристінних ефектів у полімерних матеріалах / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок // Зб. доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». К. : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 43—45.

100. Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов : ГОСТ 11645-73. — М. : Изд-во стандартов, 1973. — 12 с.

101. Босый В. В. Инженерные методы расчета погрешностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Тепломассообмен» и «Техническая термодинамика» / В. В. Босый, Г. Н. Васильченко, Е. Н. Панов. — К. , 1985. — 72 с.

102. Sokolskyi A. L. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment / A. L. Sokolskyi, I. I. Ivitskyi // Modern Scientific Research and their Practical application. — 2014. — N 21410. — P. 136—140.

103. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, І. І. Івіцький // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2014. — № 2. — С. 66—69.

104. Двойнос Я. Г. Уточнена методика оброблення експериментальних даних капілярної віскозиметрії / Я. Г. Двойнос, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2015. — № 1(14). — С. 51—54.

105. Експериментальні дослідження пристінних ефектів у полімерних матеріалах / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2015. — № 1(14). — С. 44—46.

106. Сівецький В. І. Експериментальні дослідження характеру пристінних ефектів у полімерних матеріалах / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко // Зб. доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». К. : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 50—51.

107. Barnes H. A. An Introduction to Rheology / H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters. — Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. — 199 p.

108. A Rheological Viewpoint of Thermoplastic Melts — Worcestershire: Malvern Instruments Ltd, 2005. — 4 p.

109. Wall slip of HDPEs: Molecular weight and molecular weight distribution effects / [M. Ansari, W. Yong, M. Ashish and other] // Journal of Rheology. — 2013. — N 57. — P. 927—948.

110. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — М. : Наука, 1976. — 279 с.

111. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтгомери. — Л. : Судостроение, 1980. — 384 с.

112. Моделювання плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2012. — № 1. — С. 60—63.

113. Дослідження плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2012. — № 1. — С. 63—66.

114. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, І. І. Івіцький // Хімічна промисловість України. — 2013. — № 6. — С. 34—37.

115. Ивицкий И. И. Моделирование пристенного скольжения полимера / И. И. Ивицкий // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — № 3. — С. 8—11.

116. Сівецький В. І. Методики визначення наявності, характеру та величини пристінних ефектів при течії полімерних матеріалів / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Технологический аудит и резервы производства. — 2015. — № 4. — С. 48—52.

117. Формування полімерних матеріалів. Дослідження впливу геометричних параметрів каналів обладнання на величину пристінних ефектів / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок, В. І. Сівецький // Хімічна промисловість України. — 2015. — № 4. — С. 41—44.

118. Математичне моделювання процесу плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Зб. доповідей науково-практичної конференції студентів, аспірантів та науковців «Ресурсоенерго-ефективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». — К.: Січка, 2012. — С. 25—28.

119. Численное моделирование влияния пристенного слоя на процесс течения полимера в перерабатывающем оборудовании / В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Materiały IX międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania

sa nauką i technikami-2013», Vol. 31. — Przemysł: Nauka i studia, 2013. — P. 26—28.

120. Визначення вязкості пристінного шару при моделюванні процесів переробки полімерів / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Тези доповідей Всеукраїнської конференції молодих учених та студентів «Сучасні технології одержання композиційних матеріалів, хімічних волокон і нанокompозитів». — 2013. — С. 18—19.

121. Методика учета пристенного скольжения полимера при моделировании каналов перерабатывающего оборудования / О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Матеріали науково-практичної конференції «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития». — 2014. — С. 32—33.

122. Алгоритм учета пристенного скольжения полимера в каналах формующего оборудования / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко // Матеріали науково-практичної конференції студентів, аспірантів та науковців «Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». — К.: НТУУ «КПІ», 2014. — С. 42—44.

123. Сівецький В. І. Методика визначення наявності та природи пристінних ефектів при течії полімерних матеріалів / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко // Зб. доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». К. : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 51—52.

124. Івіцький І. І. Врахування пристінних ефектів під час моделювання процесу виготовлення полімерної пакувальної плівки / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок // Матеріали IV Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності». — 2015. — С. 171—173.

125. Івіцький І. І. Комп'ютерне моделювання течії розплаву полімерних матеріалів у програмному комплексі ANSYS Polyflow / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок // Матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем. I частина». — 2015. — С. 79—81.

126. Пат. 82157U Україна, МПК В 29 С 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Рослов О.В., Коваленко К.Г., Івіцький І.І.; заявник та власник Сокольський О.Л. — № u201300518; заявл. 15.01.13; опубл. 25.07.13, Бюл. № 14.

127. Пат. 82205U Україна, МПК В 29 С 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Рослов О.В., Коваленко К.Г., Івіцький І.І.;

заявник та власник Сокольський О.Л. — № u201301458; заявл. 07.02.13; опубл. 25.07.13, Бюл. № 14.

128. Пат. 102908U Україна, МПК В 29 С 47/60. Черв'як екструдера / Сокольський О.Л., Мікульонок І.О., Івіцький І.І.; заявник та власник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". — № u201504969; заявл. 21.05.15; опубл. 25.11.15, Бюл. № 22.

129. Модернізація черв'ячного екструдера / [В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, І. І. Івіцький та ін.] // 36. доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». К. : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 51—52.

130. Басов Н. И. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов / Н. И. Басов. — М. : Химия, 1991. — 352 с.

131. Каплун Я. Б. Формующее оборудование экструдеров / Я. Б. Каплун, В. С. Ким. — М. : Машиностроение, 1967. — 159 с.

132. Производство изделий из полимерных материалов : учеб. пособие / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко. — СПб. : Профессия, 2004. — 464 с.

133. Мирзоев Р. Г. Основы конструирования и расчета деталей из пластмасс и технологической оснастки для их изготовления / Р. Г. Мирзоев. — М. : Машиностроение, 1972. — 416 с.

134. Жданов Ю. А. К вопросу универсальности каналов плоскощелевых головок равного сопротивления / Ю. А. Жданов, Д. Д. Рябинин, П. К. Допира // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1973. — Вып. 18. — С. 7—12.

135. Раувендааль К. Выявление и устранение проблем в экструзии / К. Раувендааль, М. д. Пилар Норьета Е., Х. Харрис ; пер. с англ. под ред. В. П. Володина. — СПб. : Профессия, 2008. — 328 с.

136. Особенности моделирования коллектора плоскощелевой головки для изготовления пленок большой ширины / Р. З. Бакиров, В. А. Сенатос, С. Н. Михайлов, М. Л. Фридман // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1990. — Вып. 51. — С. 36—39.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Перелік умовних позначень, символів і скорочень	5
1. Сучасний стан дослідження процесів течії полімеру	6
1.1. Огляд математичних моделей течії полімерних матеріалів з урахуванням пристінних ефектів	6
1.1.1. Модель тертя на основі узагальненої ньютонівської моделі в'язкої рідини... 6	
1.1.2. Модель тертя на основі кінетичної теорії	9
1.1.3. Анізотропна модель тертя	11
1.2. Огляд методик визначення величини пристінних ефектів у полімерних матеріалах	12
1.2.1. Аналітичний метод розв'язання задачі течії рідини в приграничному шарі 12	
1.2.2. Метод визначення в'язкосних властивостей розплаву і впливу стінки на ці властивості	13
1.2.3. Дослідження профілю швидкостей під час течії розплаву в циліндричних каналах.....	17
1.2.4. Метод врахування пристінних ефектів під час ковзання розплаву по стінці каналу	19
1.2.5. Метод Муні	21
1.2.6. Поправка Рабіновича.....	22
1.3. Висновки і завдання досліджень	24
2. Експериментальні дослідження	25
2.1. Дослідно-експериментальна установка	25
2.2. Методика дослідження	29
2.2.1. Методика виявлення наявності та характеру пристінних ефектів у полімерному матеріалі	31
2.2.2. Методика визначення параметрів матеріалу за умови його ковзання по стінці	31
2.2.3. Методика визначення параметрів матеріалу за умови утворення низькомолекулярного шару	33
2.3. Розрахунок похибок дослідження	34
2.3.1. Методика розрахунку похибок прямих вимірювань	34
2.3.2. Методика розрахунку похибок непрямих вимірювань.....	35
2.3.3. Розрахунок похибки вимірювання температури.....	35
2.3.4. Розрахунок похибки вимірювання маси	36
2.3.5. Розрахунок похибки вимірювання часу	37
2.3.6. Розрахунок похибки непрямих вимірювань швидкості зсуву	38
2.4. Визначення характеру, величини пристінних ефектів та параметрів матеріалу	39
2.4.1. Поліетилен високого тиску 15803-020	39
2.4.2. Поліетилен високого тиску з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105	42
2.4.3. Севілен 11104-030	45
2.4.4. Севілен 11104-030 з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105.....	48
2.4.5. Полістирол марки ПС-С-1-3	51
2.4.6. Полістирол ПС-С-1-3 з додаванням змащувального агенту Zell Chemia CWN-105	54

2.4.7. Полістирол ПС-С-1-3 вторинний.....	58
2.5. Властивості матеріалу	61
2.5.1. Полістирол ПС-С-1-3	61
2.5.2. Поліетилен високого тиску 15803-020	61
2.5.3. Севілен 11104-030	62
2.6. Нестабільності потоку розплаву полімеру	63
2.7. Висновки.....	63
3. Математичне моделювання процесу	65
3.1. Математична модель	65
3.2. Встановлення параметрів математичної моделі	66
3.2.1. Геометричні параметри та скінченноелементна сітка	66
3.2.2. Граничні умови математичної моделі	67
3.2.3. Дослідження збіжності сітки.....	67
3.2.4. Підтвердження адекватності моделі.....	69
3.2.5. Підтвердження адекватності ізотермічного припущення	70
3.2.6. Підтвердження адекватності екстраполяції результатів досліджень на некруглі канали.....	71
3.3. Результати математичного моделювання.....	72
3.3.1. Результати моделювання каналу циліндричної геометрії.....	72
3.3.2. Результати моделювання для каналу прямокутної геометрії	79
3.3.3. Результати моделювання для каналу з геометрією формуючої головки.....	82
3.4. Регресивні математичні моделі	84
3.4.1. Регресивна модель пристінних ефектів у конічному каналі.....	85
3.4.2. Регресивна модель пристінних ефектів у прямокутному каналі.....	87
3.5. Висновки.....	89
4. Впровадження і рекомендації	91
4.1. Головка екструзійна.....	91
4.2. Головка екструзійна.....	92
4.3. Черв'як екструдера	93
4.4. Впровадження результатів науково-технічних розробок	94
4.5. Висновки.....	95
5. Основні принципи конструювання екструзійних головок.....	96
5.1. Класифікація екструзійних головок.....	96
5.2. Чинники, що враховуються під час конструювання головок.....	97
5.3. Основні конструктивні особливості екструзійних головок.....	98
5.4. Гідравлічний розрахунок головок.....	99
5.4.1. Метод ефективної в'язкості.....	99
5.4.2. Точний метод розрахунку.....	101
5.5. Прямотечійні кільцеві і профільні головки.....	102
5.5.1. Прямотечійні кільцеві головки	102
5.5.2. Профільні головки.....	108
5.6. Плоскощілинні головки.....	111
5.7. Кутові кільцеві головки.....	116
Висновки	122
Список використаних джерел	123

Наукове видання

Івіцький Ігор Ігорович
Сокольський Олександр Леонідович
Мікульонок Ігор Олегович

**ПРИСТІННІ ЕФЕКТИ В ПРОЦЕСАХ ТЕЧІЇ
ПОЛІМЕРІВ У КАНАЛАХ ПЕРЕРОБНОГО
ОБЛАДНАННЯ**

Монографія

*В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника*